Ueber elastische Längenänderungen und Schallerregung bei Magnetisierung durch Gleich- und Wechselstrom.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

hohen philosophischen Fakultät

der

Friedrich - Alexanders - Universität Erlangen

ACAD. LANDWIRTSCH. BIBL.

vorgelegt

von

Hans Riddervold

aus Bjugn.

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Mai 1909.

Hannover 1909.

75

Druck von H. Osterwald (Inhaber H. Behrens und P. Schefe), Hannover.

Vorliegende Arbeit ist auf Veranlassung des Herrn Professors Dr. Precht im physikalischen Institut der Kgl. Technischen Hochschule Hannover ausgeführt.

Es ist mir eine angenehme Pflicht, Herrn Professor Dr. Precht für die wertvolle Anregung bei der Abfassung der Abhandlung und die freundliche Ueberlassung der notwendigen Apparate auch an dieser Stelle meinen besten Dank auszusprechen.

Ferner danke ich Herrn Geh. Reg.-Rat Professor Dr. W. Kohlrausch bestens für die Bereitwilligkeit, mit der er die Mittel seines elektrotechnischen Institutes zu Verfügung stellte.

Einleitung.

Bei Versuchen mit einer der bekannten Anordnungen zur Darstellung des sprechenden Lichtbogens zeigte sich, wenn als Selbstinduktion ein Elektromagnet benutzt wurde, dass ausser dem Bogen selbst auch der Elektromagnet zum Tönen erregt wurde. Man kann also in der Anordnung den Bogen ausschalten und erhält ein Stromschema wie Fig. 1. An dem mit 72 Volt und 20 Amp. gespeisten

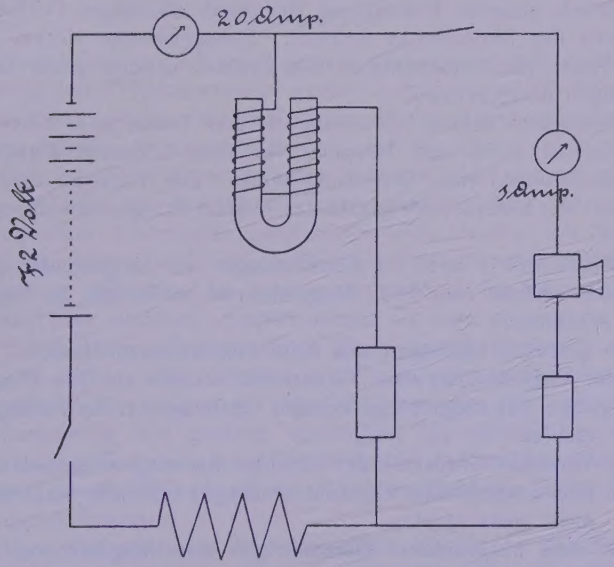


Fig. 1.

Magnetstromkreis wird als Nebenschluss ein Kreis mit einem schallaufnehmenden Mikrophon angebracht. Die Stromstärke im Mikrophonstromkreis wird auf 1 Amp. im Ruhezustande der Mikrophonmembran gehalten. Damit die Schwankungen über den Teil des Hauptstromkreises, der den Magneten enthält, sich überlagern, müssen im letzteren induktive Widerstände vorhanden sein, deren Grösse übrigens die Selbstinduktion des Magneten nicht zu erreichen braucht.

Der Versuch liefert nun das Ergebnis, dass der Magnet alle Mikrophonschwankungen, auch die durch Sprechen erregten, vollständig wiedergibt, und zwar mit einer Schallstärke, welche in gewissen

Grenzen mit der Gleichstromerregung des Magneten wächst. Dieses ist die von Prof. Precht 1902 aufgefundene Grunderscheinung, welche zur nachstehenden Untersuchung Anlass gegeben hat.

Dass bei Magnetisierung eines Eisenstabes mittelst intermittierenden Stromes ein Ton hervorgerufen wird, ist eine schon im Jahre 1838 von *Page*[1]) entdeckte Tatsache.

Die Intensität des Tones wächst mit der Stärke des magnetisierenden Stromes, wobei aber die Tonhöhe unverändert bleibt. *(Matteucci.)*[2])

Wertheim[3]) fand, dass die Tonhöhe auch dann unverändert bleibt, wenn zwei Ströme — ein konstanter und ein intermittierender — durch die Magnetisierungsspule fliessen. Durch Versuche mit mehreren magnetisierten Eisendrähten kam er zu dem Schluss, dass jeder Draht seinen Grundton gibt. Durch Magnetisieren mit unterbrochenem Gleichstrom wurde derselbe Ton erzeugt, der durch einmaliges Oeffnen und Schliessen des Stromkreises entsteht. Unmagnetische Körper gaben keine Töne; die Schwingungen des Drahtes wurden durch Längenänderungen hervorgerufen.

Besonders bekannt geworden ist das Tönen vom Eisen beim Magnetisieren durch das Telephon von *Reiss*[4]), dessen Wirkung auf Längenänderungen einer Stricknadel beruht. Die Tonhöhe der Nadel entspricht der Unterbrechungszahl des in einer Erregerspule fliessenden Stromes.

Bachmetjew[5]) stellt die Erscheinungen der Längenänderung und Tonstärke, welche man beim Magnetisieren beobachtet, in folgender Weise zusammen:

Ein Eisenstab verlängert sich beim Magnetisieren (Joule).

Beim Magnetisieren eines Eisenstabes entsteht ein Ton (Page).

Je grösser das magnetische Moment, desto grösser die Verlängerung (Joule).

Die Tonstärke wächst mit der Zunahme der magnetisierenden Kraft.

Ein stark ausgedehnter Eisenstab verlängert sich beim Magnetisieren nicht mehr (Joule).

Ein stark ausgedehnter Eisenstab gibt beim Magnetisieren keinen Ton mehr von sich (Bachmetjew).

Bei stärkerer Dehnung des Eisenstabes tritt eine Verkürzung bei der Magnetisierung ein (Joule).

Bei stärkerer Dehnung des Eisenstabes wird der Ton wieder hörbar (Bachmetjew).

Aus diesen Erscheinungen zieht er den Schluss, dass die Tonstärke eine Funktion der Längenänderung der Stäbe ist.

---

[1]) *Page*, Pogg. Ann. **43**, 411, 1838.
[2]) *Matteucci*, Archives **5**, 389, 1845.
[3]) *Wertheim*, Pogg. Ann. **77**, 43, 1849.
[4]) *P. Reiss*, Jahresber. d. phys. Ver. Frankfurt a. M. 1860 u. 61.
[5]) *Bachmetjew*, Rep. d. Phys. **26**, 137, 1890.

Honda und *Shimizu*[1]) kamen zu folgenden Schlüssen:

1. Nichtmagnetische Metalle geben keinen Ton in einem intermittierenden oder wechselnden Feld.
2. Ein Eisendraht gibt unter denselben Umständen einen Ton.
3. Die Tonhöhe entspricht der Wechselzahl.
4. Die periodischen Längenänderungen sind im allgemeinen viel grösser als wenn sie durch ein dem Maximum des Wechselfeldes entsprechendes Gleichfeld hervorgebracht werden.

Es kann demnach als bewiesen angesehen werden, dass ein Tönen zustande kommt, wenn ein Eisenstab wechselnder Magnetisierung unterworfen wird. Das Tönen ist eine direkte Folge der Längenänderungen des Eisenstabes. Die Tonhöhe entspricht der Anzahl Unterbrechungen des Erregerstromes. Wo der Grundton des Eisenstabes oder Drahtes zustande kommen kann, überwiegt dieser.

Die Grösse der Längenänderung eines Eisenstabes durch Magnetisierung mit Gleichstrom wurde zuerst von *Joule*[2]) festgestellt und ist später häufig Gegenstand der Untersuchung gewesen. Die neuesten Arbeiten sind von *Nagaoka*[3]) und *Shaw*[4]).

Die Resultate dieser Arbeiten stimmen nicht gut mit einander überein. Joule hat das Gesetz ausgesprochen, dass die Längenänderung eines Eisenstabes proportional dem Quadrat der Magnetisierung sei. *Bidwell* und *Nagaoka*[5]) haben bei schwachen Feldern eine Verlängerung gefunden, die anfangs proportional der Magnetisierung, dann langsamer zunimmt. Endlich nimmt sie sogar ab, und der Eisenstab wird in starken Feldern kürzer als im unmagnetischen Zustande.

Aus vorliegenden Arbeiten lässt sich indessen diejenige Frage nicht beantworten, welche für die Erklärung der oben angeführten Grunderscheinung von grösster Wichtigkeit ist, nämlich wie die periodische Längenänderung durch Wechselstrom in Zusammenhang steht mit einer gleichzeitig vorhandenen Längenausdehnung durch Gleichstrommagnetisierung.

Vom Verhalten der Transformatoren her ist es eine bekannte Erscheinung, dass, wenn eine Drosselspule mit Eisenkern durch Wechselstrom gespeist wird, im allgemeinen ein Tönen zustande kommt, dessen Schwingungszahl proportional der Periodenzahl des Wechselstromes ist. Das Tönen wird mit wachsender Periodenzahl, z. B. in dem Bereich zwischen 25 und 400, und Wechselstromstärke lauter; ein Eisenstab kann mit jeder beliebigen Tonhöhe tönen, obwohl die Tonstärken bei den verschiedenen Tonhöhen bezw. Periodenzahlen verschieden sind.

---

[1]) *Honda* und *Shimizu*, Phil. Mag. VI, **4**, 645, 1902.
[2]) *Joule*, Phil. Mag. **30**, 76 u. 225, 1847.
[3]) *Nagaoka*, I. Coll. Science Imp. Univ. Tokyo **13**, 57, 1900.
[4]) *Shaw*, Electrician **46**, 649 u. 738, 1900.
[5]) Wied. Ann. **53**, 487, 1894.

Eine Erklärung für die Abhängigkeit der Tonstärke von der Wechselstromstärke hat man hauptsächlich in der durch die wechselnde Magnetisierung hervorgebrachten Längenänderung des Eisenkerns gesucht.

Eine gute Uebertragung der Sprache usw. mit Hilfe eines Transformators ist aber nie möglich gewesen. Die Wiedergabe eines mit Telephonströmen erregten Magneten ist stets äusserst mangelhaft. Die Ausdehnungen und Zusammenziehungen eines Eisenkerns, der nur von einer mit Telephonströmen gespeisten Spule erregt wird, sind zu klein, um eine laute Wiedergabe der Sprache zu geben, wohingegen gemäss unserer Grunderscheinung derselbe Eisenkern sehr laut tönt, wenn gleichzeitig eine Gleichstrommagnetisierung vorhanden ist, wodurch im Eisenkern das Wechselfeld sich über das Gleichfeld lagert.

Die einfachste Erklärungsmöglichkeit für die beobachtete Tatsache ergibt sich aus der Beziehung zwischen Längenänderung und Feldstärke.

Die Kurve für die Ausdehnung des Eisens beim Magnetisieren mit Gleichstrom in ihrer Abhängigkeit von der Erregerstromstärke bezw. Kraftlinienzahl zeigt keinen einfachen Verlauf. Sie ist von mehreren Forschern bestimmt worden, auffallend ist aber, wie wenig die in diesen Untersuchungen angegebenen Werte übereinstimmen, nicht nur der Grössenordnung nach, sondern sogar in bezug auf die Natur der Kurve. Diese Abweichungen erklären sich gewiss zum Teil aus der Schwierigkeit der Beobachtung — die Ausdehnungen sind sehr klein —, zum Teil aber auch aus der Verschiedenheit der Versuchsanordnungen und benutzten Eisensorten, sodass die gezogenen Schlüsse nur mit grosser Vorsicht verallgemeinert werden dürfen.

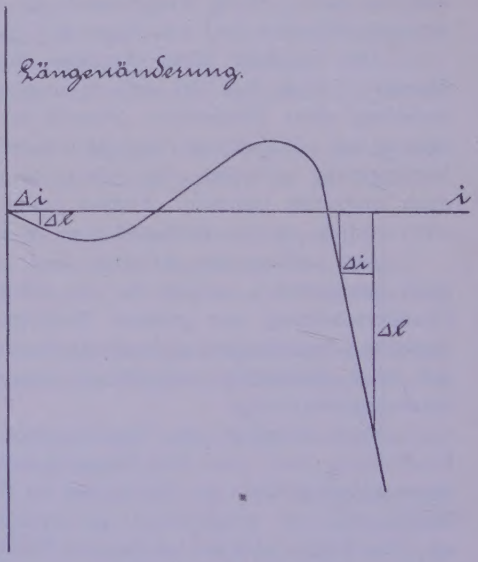


Fig. 2.

Immerhin haben die Angaben das gemeinsam, dass die Kurve für die Längenausdehnung bei grosser Erregung viel steiler verläuft als bei kleiner Erregung. Diese Erscheinung führt zu folgendem Gedanken:

Ein Eisenstück sei durch zwei Erregerspulen magnetisch gemacht, wovon die eine Wechselstrom, die andere Gleichstrom führt. Wird die Wechselstromstärke konstant gehalten, z. B. 1 Amp., so ist anzu-

nehmen, dass die periodischen Verlängerungen, die infolge der Wechselmagnetisierung zustande kommen, klein sind, wenn die Gleichstromspule stromlos ist oder einen kleinen Strom führt, dagegen wegen der Steilheit der Kurve bedeutend anwachsen, wenn ein Gleichstrom von bestimmter Stärke in der Spule fliesst. Das Eisenstück muss somit im ersten Falle schwächer, im zweiten Falle lauter tönen.

Es sei Δl (Fig. 2) die Längenänderung, die der Eisenstab erfährt, wenn der Strom in der Erregerspule von 0 Amp. auf i Amp. anwächst. Lagert sich in der Erregerspule ein Wechselstrom mit der Amplitude Δi über den Gleichstrom, so ist von vornherein anzunehmen, dass die Ausdehnung des Eisenstabes sich innerhalb der entsprechenden Grenzen bewegen muss, d. h. zwischen l und $l + \Delta l$. Da, wie aus der Figur zu ersehen ist, bei grosser Erregerstromstärke die Kurve steiler verläuft als bei kleiner, ist Δl im ersteren Falle grösser als im letzteren; bei denselben Stromschwankungen bekommen wir also im ersteren Falle ein lauteres Tönen als im letzteren.

Die Messungen in vorliegender Arbeit haben die dargelegte Auffassung bestätigt. Die Ursache des Tönens, die periodischen Schwankungen der Länge eines Eisenstabes, der mit Gleichstrom und übergelagertem Wechselstrom erregt wird, sind in ihrer Abhängigkeit von der Grösse beider Faktoren sowie von der Periodenzahl des Wechselstromes im folgenden eingehend untersucht.

Experimenteller Teil.

Zu der Untersuchung diente anfangs der Elektromagnet, an welchem die beschriebene Grunderscheinung zuerst beobachtet wurde. Er ist aus massivem Weicheisen hergestellt, hat Hufeisenform (Fig. 3), mit einem Kreisquerschnitt von etwa 22 cm², und einer Schenkellänge von rund 25 cm. Jeder Schenkel ist mit 123 Windungen bewickelt, die in 4 Lagen verteilt sind. Die Pole haben einen Abstand der Innenkanten von 48 mm. Der ganze Magnet ist auf einem festen Holzgestell angebracht, so dass die Polflächen frei nach oben stehen.

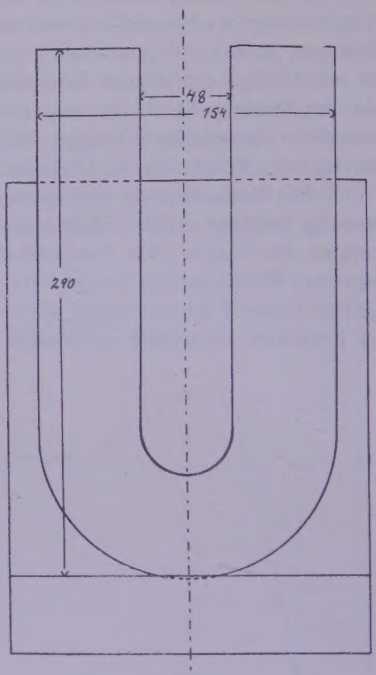


Fig. 3.

Die mit diesem Magneten ausgeführten Versuche zerfallen in:

I. Untersuchung der Schallwiedergabe.

II. Untersuchung der Formänderungen, die der Magnet erfährt, wenn er mit Gleichstrom erregt wird.

a) Bewegung der Polflächen in Richtung der Schenkel: Longitudinale Aenderung.

b) Gegenseitige Annäherung der Pole: Transversale Aenderung.

I. Untersuchung der Schallwiedergabe.

Als Schallquelle wurde ein Phonograph benutzt, in dessen unmittelbarer Nähe ein Mikrophon *m* aufgestellt war (Fig. 4). Der Magnet *M* befand sich in einem weit vom Mikrophon entfernten Raum. Die für diesen Zweck benutzte Schaltung unterscheidet sich von den gewöhnlichen für Telephone üblichen Schaltungen dadurch, dass der Mikrophonkreis einen Nebenschluss des Magnetstromkreises bildet.

Durch das Sprechen des Phonographen gegen das Mikrophon ändert sich fortwährend dessen Widerstand. Der Mikrophonstrom i ist klein (1 Amp.) gegen den Magnetstrom I_m (10—20 Amp.).

Durch den schwankenden Widerstand des Mikrophones wird nicht nur der Mikrophonstrom i, sondern auch der Magnetstrom I_m beeinflusst, indem das ganze System an einer konstanten Spannung von 72 Volt liegt. Im Hauptstromkreis befindet sich ein Ohmscher

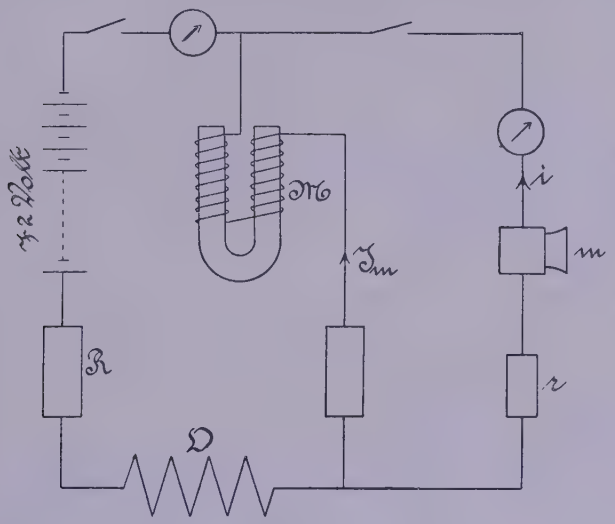


Fig. 4.

Vorschaltwiderstand R sowie ein induktiver Widerstand D. Man kann also den Hauptstrom durch R ändern und den Mikrophonstrom i durch den Widerstand r konstant halten.

Es zeigt sich, dass beim Sprechen des Phonographen gegen das Mikrophon eine Wiedergabe am Magneten M zustande kommt, die bei 18 Amp. Magnetstromstärke erheblich lauter ist als bei 10 Amp., obwohl die mittlere Mikrophonstromstärke in beiden Versuchen gleichmässig 1 Amp. blieb. (Zu diesen wie späteren Versuchen diente ein Kohlenkörnermikrophon der Firma Berliner.)

II. Untersuchung der Formänderungen des Magneten.

Man muss zweierlei Arten von Formänderungen beim Tönen des Magneten unterscheiden, erstens die Längenänderungen jedes Schenkels, zweitens die Transversalschwingungen beider Schenkel gegen einander, welche von den Schwankungen der magnetischen Anziehungskräfte herrühren. Beide Ursachen tragen zur Tonerzeugung bei.

a) Bewegung der Magnetpole in Richtung der Schenkel.

Um eine genaue Messung der an und für sich sehr kleinen Längenänderung des Eisens zu bekommen, wurde die Interferenzmethode unter Benutzung des Pulfrich-Zeiss'schen Interferometers [1]) angewendet.

Ein fester Holzrahmen R (Fig. 5), der mit der Grundplatte des Magneten verbunden ist, überbrückt den einen Pol. Unmittelbar über der Polfläche ist in ihn ein Loch geschnitten, durch welches eine kurze auf dem Magnetpol befestigte Messingstange *m* hindurchgeht. Die obere Endfläche von *m* trägt eine geschwärzte Glasplatte *p*. Ueber dieser befindet sich in kleinem Abstande eine Planparallelplatte p_1 gehalten von einem Stelltischchen, dessen 3 Fusschrauben auf dem Holzrahmen *R* aufruhen.

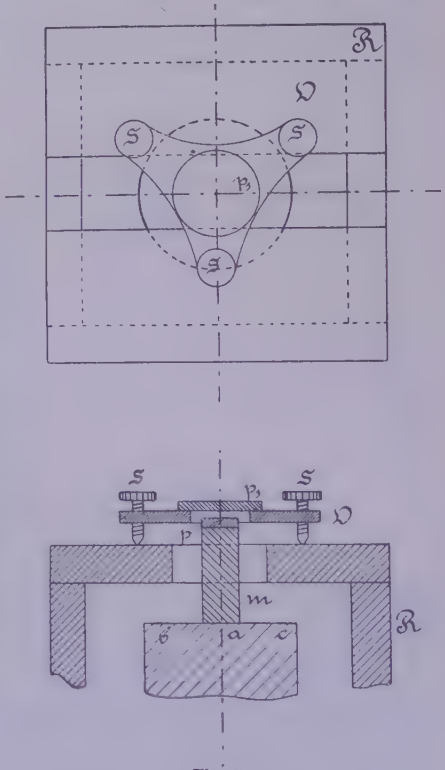


Fig. 5.

Die auf dem Magnetpol ruhende Glasplatte *p* bewegt sich mit der Endfläche des Magneten, wogegen die auf dem Dreifuss ruhende Platte p_1 eine unveränderliche Lage hat. Die im Interferometer erscheinenden Streifen werden, wenn die auf dem Magneten angebrachte Glasplatte sich auf und ab bewegt, an dem im Instrument befindlichen Fadenkreuz vorbeiwandern, und zwar um je einen Streifen, wenn der Abstand zwischen den Glasplatten sich um eine halbe Wellenlänge des angewendeten homogenen Lichtes geändert hat.

Die Messingstange wurde zunächst im Punkt a (Fig. 5) auf der Polmitte befestigt. Es wird nun für verschiedene Stromstärken die Zahl der Interferenzstreifen beobachtet, welche beim Ein- und Ausschalten des Erregerstromes am Fadenkreuz vorbeiwandern.

Da das Dilatometer auch die von der Erwärmung herrührende Ausdehnung des Eisens misst, muss die Messung möglichst schnell ausgeführt werden. Der Strom wurde bei kleinen Stromstärken ganz ein- und ausgeschaltet, bei den grossen Stromstärken aber meistens

[1]) Zeitschr. für Instrumentenkunde, 365, 1893.

durch Kurzschliessen von Widerständen von einer Stromstärkenstufe auf die nächste geändert, da das schnelle Vorbeiwandern mehrerer Streifen wegen der erschwerten Beobachtungsverhältnisse möglichst vermieden werden muss. Diese Art zu messen bringt allerdings den Nachteil mit sich, dass die Fehler der Einzelmessungen sich addieren, und dass daher die Abweichungen bei den grösseren Stromstärken verhältnismässig bedeutender werden. — Die Messungen sind im Lichte der roten Wasserstofflinie und mit Thalliumlicht ausgeführt. Natriumlicht ist der Natur der Sache nach für diese Beobachtungen wenig geeignet. Der Sinn der Bewegung der Interferenzstreifen (Verlängerung oder Verkürzung des Eisens) wurde durch besondere Kontrollbeobachtungen sichergestellt.

In nachstehenden Tabellen befinden sich die beobachteten Verschiebungen der Interferenzstreifen für wachsende Erregerstromstärke. Das Vorzeichen + bezieht sich auf eine Verlängerung, das Vorzeichen — auf eine Verkürzung des Eisens.

Versuchsreihe 1. Rote Streifen, Wasserstoffröhre.

A = Anzahl vorbeiwandernder Streifen.

B = Längenänderung beim Einschalten des Stromes von 1 Amp.

Wellenlänge $\lambda = 656\ \mu\mu$ $\quad \frac{\lambda}{2} = 328\ \mu\mu$

Tabelle Nr. 1.

Nr.	A	Stromstärke	B
1	— 0,2	0 — 5,1	— 66
2	0	0 — 8,0	0
3	+ 1,0	8,0 — 21,0	+ 330
4	+ 0,2	8,0 — 11,5	66
5	+ 0,4	8,0 — 14,0	132
6	+ 0,7	8,0 — 16,0	231
7	+ 0,8	8,0 — 17,8	264
8	+ 0,9	8,0 — 19,5	297
9	+ 1,0	21,0 — 28,0	330 + 330 = 660
10	+ 0,1	21,0 — 22,2	330 + 33 = 363
11	+ 0,4	21,0 — 24,0	330 + 132 = 462
12	+ 0,5	21,0 — 25,0	330 + 165 = 495
13	+ 0,7	21,0 — 26,3	330 + 231 = 561
14	+ 0,5	26,7 — 31,3	580 + 165 = 745
15	+ 0,2	29,0 — 32,0	675 + 66 = 741
16	+ 0,6	28,0 — 34,0	660 + 198 = 858
17	+ 1,0	28,0 — 40	660 + 330 = 990
18	+ 0,2	40 — 50	990 + 66 = 1056

Versuchsreihe 2. Grüne Streifen, Thalliumlicht.

Wellenlänge $\lambda = 535\ \mu\mu$ $\quad \frac{\lambda}{2} = 267\ \mu\mu$

Tabelle Nr. 2.

Nr.	*A*	Stromstärke	*B*	Nr.	*A*	Stromstärke	*B*
1	0	0 — 8,3	0	7	+ 0,6	19 — 25,2	535
2	+ 0,3	0 — 12	80	8	+ 0,3	25,2 — 28,0	615
3	+ 0,5	0 — 16	134	9	+ 0,7	25,2 — 30,0	722
4	+ 1,0	0 — 19	267	10	+ 1,1	25,2 — 32,5	828
5	+ 1,5	0 — 22	401	11	+ 1,7	25,2 — 38,0	989
6	+ 1,0	19 — 22,7	427				

Die beiden Versuchsreihen stimmen innerhalb der Grenzen der Beobachtungsfehler recht befriedigend überein.

Da es von Bedeutung ist zu wissen, ob die Polflächen sich in Richtung der Schenkel parallel verschieben, oder ob etwa eine Neigung der Polflächen vorhanden ist, sind auch die Verschiebungen der zwei Randstellen *b* und *c* (Fig. 5) gemessen. Wenn die Verschiebungen in den drei Punkten nicht gleich sind, ist eine Neigung der Polfläche vorhanden, die der Grössenordnung nach berechnet werden kann.

Die Messingstange mit Glasplatte wurde in *b* und *c* angebracht und die Verlängerung beim Magnetisieren wie vorher gemessen. Es stellte sich heraus, dass die Ausdehnung in *b* bedeutend grösser, in *c* bedeutend kleiner ist als die in der Mitte bei *a* gemessene Verlängerung, wie die folgenden Beobachtungen zeigen.

Beleuchtung mit Thalliumlicht.

Tabelle Nr. 3. Stellung *b*.

Nr.	*A*	Stromstärke	*B*	Nr.	*A*	Stromstärke	*B*
1	0	0 — 8	0	10	0,5	21 — 24	669
2	0,3	0 — 10	80	11	1,2	21 — 26	854
3	0,5	0 — 12	134	12	1,0	21 — 25	800
4	0,6	0 — 13,2	160	13	0,3	25 — 27	880
5	1,0	0 — 16	267	14	1,0	25 — 29,5	1067
6	0,3	16 — 18	347	15	1,0	25 — 32,5	1067
7	0,7	16 — 20,5	454	16	1,3	25 — 36	1147
8	1,3	16 — 22	615	17	0,8	30 — 44	1280
9	1,0	16 — 21	535				

Tabelle Nr. 4. Stellung *c*.

Nr.	*A*	Stromstärke	*B*	Nr.	*A*	Stromstärke	*B*
1	0	0 — 10,2	0	7	1,2	22 — 30,3	587
2	0,2	0 — 14	53	8	1,0	22 — 29	533
3	0,5	0 — 18	133	9	0,2	29 — 33,5	586
4	1,0	0 — 22	267	10	0,4	29 — 36	639
5	0,4	22 — 25	373	11	0,8	29 — 42	747
6	0,7	22 — 27,5	454	12	1,0	29 — 48	800

Da im Punkte c die Ausdehnungen beim Magnetisieren kleiner sind als in a und b, müssen demnach die Polflächen beim Erregen sich etwas schräg stellen. Die Neigung kann für jede Stromstärke angenähert berechnet werden; der Winkel ist gleich Ausdehnung in b — Ausdehnung in c dividiert durch den Abstand $b\,c$. Somit ist der Neigungswinkel α in Bogenmass bei i Amp. Stromstärke:

i	α
50	$2{,}3 \cdot 10^{-5}$
38	$1{,}8 \cdot 10^{-5}$
28	$1{,}8 \cdot 10^{-5}$

Um eine unabhängige Bestimmung der Neigung der Polflächen zu bekommen, wurde ein Planspiegel auf die eine Polfläche geklebt, und an dem horizontal liegenden Magneten mittelst Fernrohr und Skala die beim Magnetisieren auftretende Drehung des Spiegels ermittelt. Es war:

Abstand $\left.\begin{matrix}\text{Fernrohr}\\ \text{Skala}\end{matrix}\right\}$ Magnet $a = 26{,}5$ m

Ausschlag l in mm bei i Amp.

Nr.	i	l	α
1	50	3,2	$6 \cdot 10^{-5}$
2	38	3	$5 \cdot 10^{-5}$
3	28	2	$4 \cdot 10^{-5}$

Diese Methode liefert also der Grössenordnung nach gleichen Neigungswinkel.

b. Verschiebung der Polflächen gegen einander.

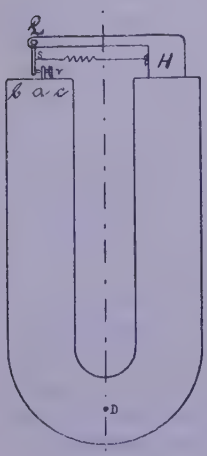
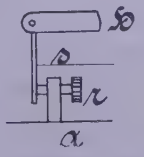


Fig. 6.



Da bewiesen ist, dass die Polflächen sich neigen, so hat demnach eine Anziehung der Magnetschenkel stattgefunden, die ihrem Betrage nach zunächst mit dem Kathetometer zu messen versucht wurde. Die Methode erwies sich indessen als wenig brauchbar.

Um ein genaueres Resultat zu erzielen, wurde, wie aus Fig. 6 zu ersehen ist, mit einem auf dem Magnetpol gekitteten Stück Hartholz H eine unmagnetische Verbindung zu einem 4 cm über dem anderen Magnetpol gelegenen Punkt L hergestellt. An L ist drehbar ein Spiegelchen s aufgehängt, das, von einer schwachen Feder gezogen, sich gegen eine auf der Mitte des

Magnetpols befestigte Schraube r auflegt. Die relative Verschiebung 2δ kann durch Messung der Winkelbewegung des Spiegels unter Berücksichtigung des Abstandes c Lager-Spitze berechnet werden.

Es ist:

Abstand $\left.\begin{matrix}\text{Skala}\\ \text{Fernrohr}\end{matrix}\right\}$ Spiegel $a = 17{,}5$ m

Ausschlag in cm α bei der Erregerstromstärke i.

Länge eines Magnetschenkels 27 cm

Winkeldrehung einer Polfläche $= \varphi$

unter der Voraussetzung ausgerechnet, dass die Schenkel gerade bleiben, indem die Drehung um einen Punkt D stattfindet.

Es sind:

Tabelle Nr. 5.

Nr.	i_0	α_0	α_i	α	2δ	φ	i
1	0	52,8	57,8	5,0	0,024	$4{,}4 \cdot 10^{-5}$	48
2	0	30,3	34,6	4,5	0,022	4,1 .	41
3	0	30,8	34,3	3,5	0,017	3,2 .	34
4	0	31,7	34,0	2,3	0,011	2,0 .	27
5	0	30,3	31,5	1,2	0,006	1,1 .	20,5
6	0	29,1	30,0	0,9	0,004	0,8 .	18

Die Grösse des Winkels φ steht somit in Uebereinstimmung mit den früher, Seite 15, gefundenen Resultaten.

Da die Bewegung der Polflächen in Richtung der Magnetschenkel (longitudinal) beim Einschalten einer grossen Erregerstromstärke nur von der Grössenordnung 0,001 mm ist, während die Bewegungen der Magnetpole in der dazu senkrechten Richtung, die infolge der gegenseitigen Anziehungen der Pole auftreten, ca. 20 mal grösser sind, so ist anzunehmen, dass, auch wenn der Magnet mit Wechselstrom oder mit einem periodisch schwankenden Gleichstrom erregt wird, die Bewegungen hauptsächlich in einer mehr oder weniger starken Veränderung im Abstande der Polflächen bestehen, und also senkrecht zu der Achse der Schenkel verlaufen. Demnach muss geschlossen werden, dass das Tönen und Sprechen des Magneten vorwiegend durch diese grösseren Bewegungen bedingt wird, und dass die Längenänderungen des Eisens in Richtung der Schenkelachsen die kleinere Rolle spielen. Für eine eingehendere Untersuchung der Ursachen des Tönens und Sprechens erscheint demnach dieser Magnet weniger geeignet. Denn da die Formänderungen sowohl in einer Längenausdehnung als in einer gleichzeitigen Querbewegung der Schenkel bestehen, lässt sich schwer der Anteil der Einzelbewegung an der Erzeugung des beobachteten Schalles feststellen. Es war daher nötig, zu einer neuen Magnetform überzugehen, bei welcher Querbewegungen nicht auftreten können. Dieses Ziel wird am besten erreicht durch einen Magneten aus einem geraden zylindrischen Eisenstab von beträchtlicher Dicke,

der gegen seine Magnetisierungsspule zentriert, naturgemäss nur Formänderungen annehmen kann, die in Ausdehnungen und Zusammenziehungen des Magneteisens bestehen. Im folgenden wird ein solcher Magnet benutzt. Er wird mit Gleichstrom und darübergelagertem Wechselstrom erregt und nach Tonstärke, Kraftlinienzahl, Amplitude der periodischen Ausdehnungen des Eisens und deren Abhängigkeit von der Periodenzahl des übergelagerten Wechselstromes eingehend untersucht.

Magnet II (Fig. 7)

besteht aus einem Eisenstab von 25 cm Länge. Der mittlere Teil ist ein Zylinder, dessen Länge 18,5 cm und dessen kreisförmiger Querschnitt 35 cm² ist. Die zylinderförmigen Enden haben eine Länge von 4 und 2,5 cm resp. oben und unten und einen Querschnitt von etwa 14,5 cm². Konzentrisch mit der Achse geht eine Bohrung mit einem Durchmesser von 0,7 cm. Der mittlere Eisenzylinder ist mit einer Wicklung versehen, die 16 Lagen von je 46 Windungen = 736 Windungen enthält. Der ganze Kern besteht aus einem massiven Stück Eisen.

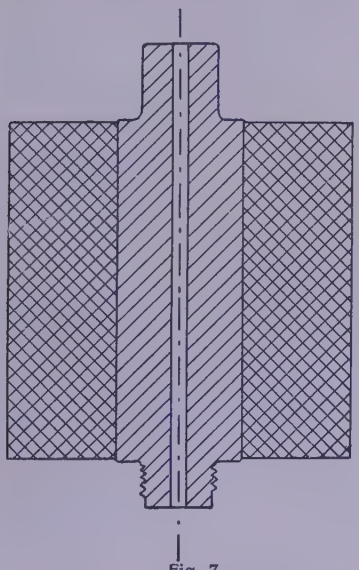


Fig. 7.

Die Untersuchung ist nach folgendem Plan vorgenommen:

I. Untersuchung der Schallwiedergabe.

II. Messung der Längenausdehnung bei Gleichstromerregung:

1) Mit Interferometer.
2) Mit Hebelmethode.

III. Messungen der periodischen Verlängerungen des Eisenstabes bei Gleichstromerregung mit übergelagertem Wechselstrom nach der Hebelmethode.

IV. Messungen mit einer empfindlichen Schneidenhebelanordnung:
Amplitude der Verlängerung und Tönen bei Erregung mit Gleichstrom und übergelagertem Wechselstrom.

V. Hilfsmessungen: Bestimmung der Feldstärke abhängig von der Erregung. Messung der Aenderung der Kraftlinienzahl bei Gleichstrom mit übergelagertem Wechselstrom. Verlängerung des Eisens bei Gleichstromerregung.

Untersuchung der Schallwiedergabe.

Wegen der Anordnung verweise ich auf das früher benutzte Schema Fig. 4. Ein Tönen kommt auch mit diesem Magneten zustande. Besonders sei hier wieder auf das Bestehen der Grunderscheinung hingewiesen, wie es sich aus dem Vergleich der folgenden beiden Versuchsanordnungen ergibt.

1. Der Magnet, ein Strommesser (Fig. 8), Vorschaltwiderstand und das Mikrophon, gegen welches der Phonograph sprach, werden hintereinandergeschaltet und an eine Spannung von 8 Volt gelegt. Infolge des schwankenden Widerstandes des Mikrophons ändert sich der Mikrophonstrom, der zugleich der Magnetstrom ist und ohne Schallerregung etwa 1 Amp. beträgt, beim Tönen um etwa 0,2 Amp. Der Magnet tönte sehr schwach.

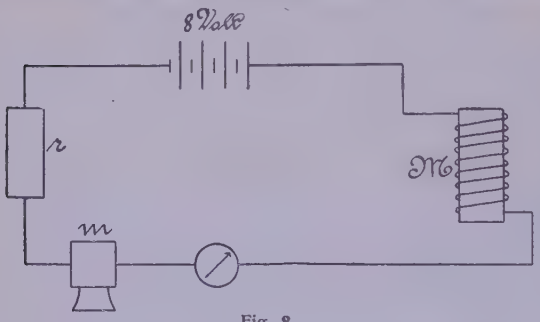


Fig. 8.

2. Das Mikrophon, mit Strommesser und Widerstand wie unter 1. an eine Akkumulatorenbatterie von 8 Volt (Fig. 9) angeschlossen,

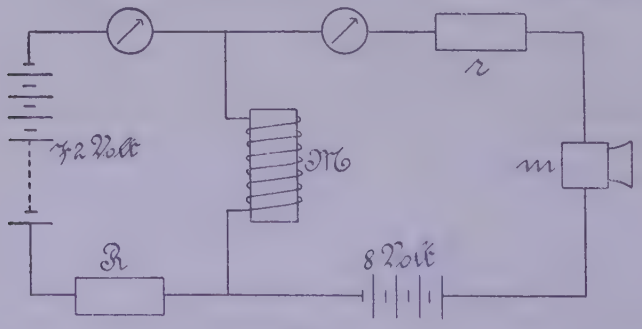


Fig. 9.

liegt im Nebenschluss zu dem Magneten, der seinerseits durch eine Batterie von 72 Volt Spannung erregt wird. *R* ist ein Ohmscher Vorschaltwiderstand. Wenn der Phonograph gegen das Mikrophon spricht, ändert sich dessen Stromstärke, die im Ruhezustande 1 Amp. beträgt, genau wie oben um etwa 0,2 Amp. Der Magnet, der von 20 Amp. Gleichstrom durchflossen wird, tönt unter diesen Umständen ganz wesentlich lauter.

Es ist zu ersehen, dass die Magnetstromstärke im zweiten Falle nicht grössere Schwankungen aufweisen kann als im ersten Falle; im

Gegenteil lässt die Anordnung die Möglichkeit zu, dass ein Teil der Schwankungen, die der Strommesser am Mikrophon anzeigt, gar nicht den Weg über den Magneten nimmt. Das gleichzeitig vorhandene Gleichstromfeld befördert demnach das Tönen erheblich.

Messung der Längenänderungen bei Gleichstromerregung.

1. Mit Interferometer.

Anordnung: Die untere Fläche des mittleren zylindrischen Teiles des Magneteisens wurde auf eine starke Holzplatte gesetzt, die mit einer Bohrung versehen war, so dass der ganze Magnet auf der unteren Fläche des Eisenzylinders ruhte. Auf dieser Grundplatte war ein fester Holzrahmen R angebracht, der mit seinen Seitenwänden den ganzen Magneten umfasste (Fig. 5). Die obere horizontale, über dem Magnetpol durchbohrte Holzplatte dieses Rahmens trägt einen Dreifuss D mit Stellschrauben. Auf diesem liegt eine planparallele Glasplatte p_1. Das ganze System war eisenfrei.

Auf den oberen Magnetpol wurde genau wie früher eine mit einer geschliffenen Glasplatte p versehene Messingstange m geklebt, die zunächst 4 cm lang war, so dass diese Glasplatte p sich dicht unter derjenigen p_1 auf dem Dreifuss befand. Die untere Glasplatte muss den Bewegungen folgen, die der obere Magnetpol macht, während die auf dem Dreifuss ruhende obere Glasplatte mit dem unteren Magnetpol in fester Verbindung ist. Die relative Verschiebung beider Glasplatten gibt also zu jeder Zeit die relative Verschiebung der beiden Pole.

Die mit diesem Magneten gemachten Dilatometermessungen wurden nach denselben Methoden ausgeführt wie diejenigen mit dem Magneten I. In diesem Falle kam stets Thalliumlicht zur Anwendung.

Um einen Ueberblick über die wirklichen Formänderungen des Magneten zu erhalten, wurden zwei verschiedene Reihen von Beobachtungen angestellt:

α. Die 4 cm lange Messingstange liegt in der Achse des Magneten (Stellung a).

β. Die 4 cm lange Messingstange wurde am Rande des Eisenkernes befestigt (Stellung c).

Tabelle Nr. 6. Stellung a.

Nr.	Verschieb.	Stromstärke	Verlängerung	Nr.	Verschieb.	Stromstärke	Verlängerung
1	0,3 r	0 — 4,7	— 80	6	0,5 l	16,5 — 20,2	+ 132
2	0,4 r	0 — 6,8	— 107	7	0,7 l	16,5 — 21,5	+ 187
3	0,2 r	0 — 9,7	— 53	8	0,8 l	16,5 — 24,0	+ 213
4	0,1 r	0 — 14	— 27	9	0,8 l	16,5 — 30,0	+ 213
5	0	0 — 16,5	0	10	0	0 — 32	0

Tabelle Nr. 6. Stellung *a*.
(Fortsetzung.)

Nr.	Verschieb.	Stromstärke	Verlängerung	Nr.	Verschieb.	Stromstärke	Verlängerung
11	0,1 *l*	0 — 33	+ 27	16	1,1 *r*	32,5 — 36,0	— 294
12	0,5 *r*	32 — 34	— 132	17	1,2 *r*	35,6 — 39,0	— 577
13	0,5 *r*	31,5 — 33,5		18	0,7 *r*	38,3 — 41,7	— 721
14	0,7 *r*	32,5 — 34,5	— 187	19	1,1 *r*	38,3 — 44,0	— 828
15	0,9 *r*	32,5 — 35,2	— 241	20	1,3 *r*	38,3 — 45,0	— 881

Tabelle Nr. 7. Stellung *c*.

Nr.	Verschieb.	Stromstärke	Verlängerung	Nr.	Verschieb.	Stromstärke	Verlängerung
1	0,3 *r*	0 — 5	— 80	16	0,1 *l*	0 — 33	+ 27
2	0,4 *r*	0 — 7	— 107	17	0	0 — 33,5	0
3	0,2 *r*	0 — 9	— 53	18	0,1 *r*	0 — 34,5	— 27
4	0,1 *r*	0 — 11	— 27	19	0,5 *r*	33,5 — 35,2	— 133
5	0	0 — 12,5	0	20	0,8 *r*	33,5 — 36,0	— 213
6	0	0 — 14,0	0	21	1,0 *r*	33,5 — 36,8	— 267
7	0,1 *l*	0 — 15,8	+ 27	22	1,2 *r*	33,5 — 37,3	— 320
8	0,2 *l*	0 — 17,0	+ 53	23	0,5 *r*	36,8 — 38,5	— 400
9	0,3 *l*	0 — 19	+ 80	24	0,7 *r*	36,8 — 39,2	— 453
10	0,6 *l*	0 — 21	+ 160	25	1,0 *r*	36,8 — 40,5	— 534
11	0,7 *l*	0 — 23	+ 187	26	1,3 *r*	36,8 — 42,0	— 614
12	0,7 *l*	0 — 24,5	+ 187	27	0,4 *r*	40,5 — 42,0	— 641
13	0,8 *l*	0 — 26,5	+ 214	28	0,8 *r*	40,5 — 44,0	— 748
14	0,8 *l*	0 — 28,5	+ 214	29	1,2 *r*	40,5 — 46,0	— 855
15	0,4 *l*	0 — 32	+ 107				

Die Resultate dieser beiden Reihen stimmen so gut überein, wie man nach der Genauigkeit der Messmethode erwarten kann. Der Eisenkern biegt sich nicht, sondern die Bewegung besteht nur in einer Parallelverschiebung der oberen Polfläche.

Eine mögliche Fehlerquelle der Anordnungen unter α) und β) besteht noch darin, dass der Dreifuss D aus Messing sowie die obere Glasplatte p_1, welche bei den Versuchen sich in einem starken Magnetfeld befinden, vielleicht eine merkbare Anziehung erfahren. Um diesen Fehler zu beseitigen, wurde das Holzstativ 10 cm höher gemacht, wodurch Messingdreifuss und Glasplatte weit von den Stellen grosser Feldstärke entfernt werden. Die Messingstange auf der oberen Polfläche musste dann 14,5 cm lang genommen werden, damit die Glasplatten wieder ganz nahe an einander lagen.

Die Messungen zeigen, dass die vermutete Anziehung tatsächlich nicht vorhanden ist, oder wenigstens, dass das Holzstativ unter der anziehenden Kraft nicht merkbar durchgebogen wird. Die Messungen ergeben:

γ. Messingstange 14,5 cm in der Achse des Magneten.

Tabelle Nr. 8.

Nr.	Verschieb.	Stromstärke	Verlängerung	Nr.	Verschieb.	Stromstärke	Verlängerung
1	0,2 *r*	0 — 2,0	— 53	13	0,6 *l*	0 — 22,8	+ 160
2	0,4 *r*	0 — 3	— 107	14	0,7 *l*	0 — 25,7	+ 187
3	0,4 *r*	0 — 4	— 107	15	0,7 *l*	0 — 27,2	+ 187
4	0,4 *r*	0 — 5	— 107	16	0,4 *l*	0 — 30	+ 107
5	0,4 *r*	0 — 5,5	— 107	17	0	0 — 32,5	0
6	0,3 *r*	0 — 7,3	— 80	18	0,3 *r*	0 — 34	— 80
7	0,2 *r*	0 — 10	— 53	19	0,6 *r*	32,5 — 35	— 160
8	0	0 — 13	0	20	1,0 *r*	32,5 — 35,5	— 267
9	0	0 — 15	0	21	1,2 *r*	32,5 — 36,4	— 320
10	0,2 *l*	0 — 17	+ 53	22	1,0 *r*	35,5 — 38,5	— 534
11	0,3 *l*	0 — 19	+ 80	23	0,3 *r*	38,5 — 40,0	— 614
12	0,5 *l*	0 — 21	+ 133	24	1,2 *r*	38,5 — 42,0	— 854

Die Resultate stimmen mit den vorher gefundenen Reihen gut überein. Wir können sie daher zu Mittelwerten vereinigen, die in Fig. 16 durch eine Kurve wiedergegeben sind, bei der die Ordinaten die Verlängerungen in $\mu\mu$, die Abszissen die zugehörigen Erregerstromstärken sind.

Die Beobachtungen zeigen, dass der Eisenstab sich mit wachsender Feldstärke erst zusammenzieht, dann ausdehnt, und dann wieder zusammenzieht, so dass er in einem starken Felde kürzer wird als im unmagnetischen Zustande. Beim Einschalten des Erregerstromes kann man schon an dem Wandern der Interferenzstreifen dieses Verhalten erkennen; sie bewegen sich beim Einschalten entsprechend dem Anwachsen der Kraftlinienzahl im Magneten schnell hin und her genau wie es der Verlauf der Kurve angibt.

Ueber die Art der Ausdehnung eines Eisenstabes beim Magnetisieren finden sich in der Literatur die verschiedensten Angaben. Die meisten Forscher, z. B. *Nagaoka*[1]), *Shaw*[2]), haben das erste Minimum, das unsere Kurve zeigt, nicht beobachtet. Die Längenänderung eines Eisenstabes ist zweifellos ausser von der Eisensorte auch von der Dicke des Stabes sehr abhängig. So hat *Shaw*[2]), der mit drei Stäben von

[1]) Wied. Ann. **53**, 492, 1894.
[2]) Electrician **46**, S. 649 und 738, 1900.

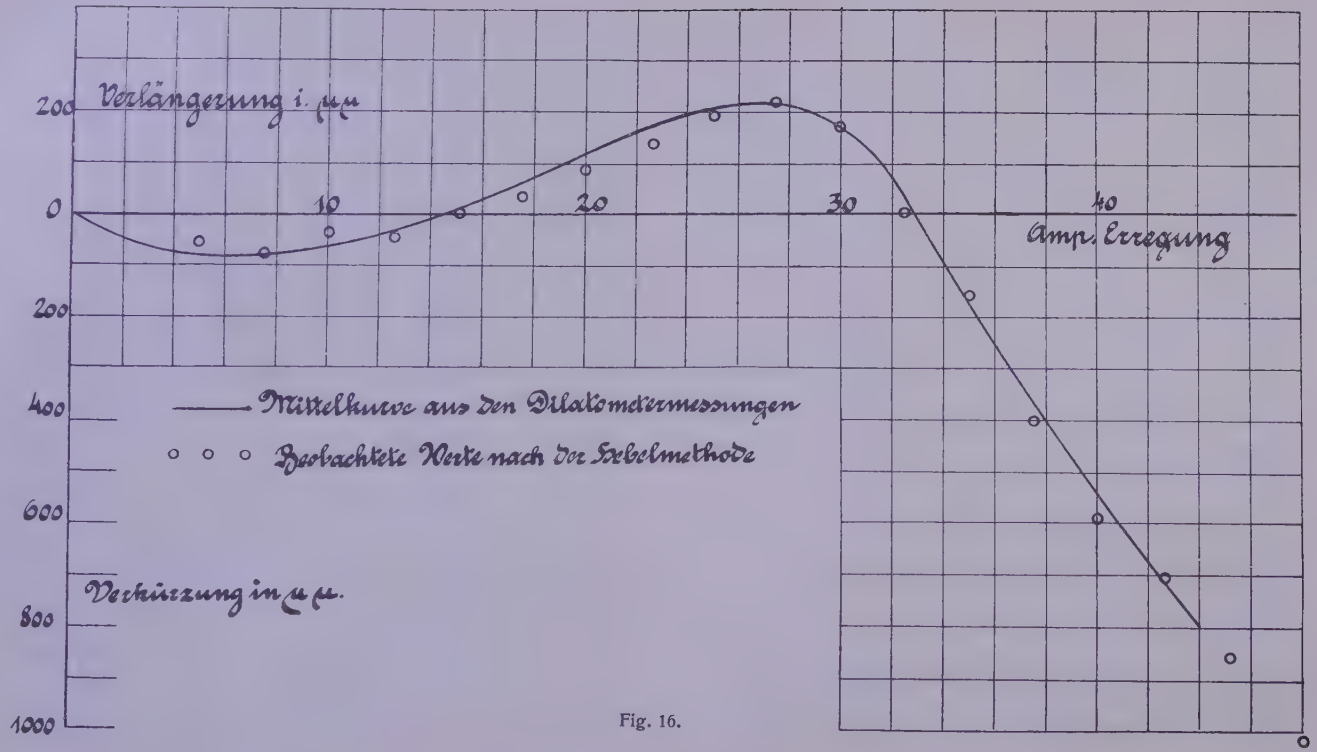

Verlängerung i. μμ
200
0
200
400
600
800
1000
10
20
30
40
Amp. Erregung
Mittelkurve aus den Dilatometermessungen
Beobachtete Werte nach der Hebelmethode
Verkürzung in μμ.

Fig. 16.

verschiedenen Durchmessern arbeitete, auffallend verschiedene Kurven gefunden. Demnach ist ein völlig zutreffendes Bild von der gesamten Formänderung des Eisenstabes nur zu gewinnen, wenn ausser der Verlängerung auch die Querschnittsänderung bei Magnetisierung gemessen wird.

Als wichtigstes Ergebnis entnehmen wir aus unserer Kurve die Tatsache, dass die Länge bei grosser Sättigung sich verhältnismässig schneller ändert als für kleine Feldstärken. Die Kurve verläuft im Bereich von 30 Amp. bis 45 Amp. wesentlich steiler als bei den kleinen Stromstärken.

Wenn die Erregerstromstärke um einen gewissen Betrag periodisch schwankt, d. h. wenn der Magnet mit Gleichstrom und übergelagertem Wechselstrom erregt wird, ist zu erwarten, dass die Länge sich entsprechend periodisch ändert und zwar mehr für den steileren Kurventeil. Die Beobachtungen bestätigen diese Ueberlegung. Es ist indessen hier nicht beabsichtigt zu messen, wie die Länge des Magneten sich während einer Periode ändert, sondern nur, wie gross die Amplitude der Bewegung ist, d. h. zwischen welchen Grenzen die Länge des Magneten sich ändert, wenn die Erregerstromstärke zwischen z. B. 17 und 18 Amp. schwankt. Wenn periodisch verlaufende Längenänderungen gemessen werden sollen und die Dauer der Periode so kurz ist, dass man im Interferometer das Hin- und Herwandern der Streifen nicht mehr beobachten kann, müssen andere Mittel gesucht werden, um die Amplitude der Längenänderung zu messen. Ich benutzte eine Hebelmethode, welche die Messung sowohl einer periodischen Ausdehnung als auch der Längenänderungen bei Gleichstromerregung gestattet.

2. Messung der Längenänderung bei Gleichstromerregung nach einer Hebelmethode.

Anordnung. Durch die Bohrung des Eisens wurde ein Glasstab g (Fig. 10) geführt, der am unteren Ende des Magneten mittelst einer Kupferplatte und Schraube befestigt, am oberen Ende E_2 dagegen frei war. Ein Messingrohr m diente als Führung des freien Endes.

Am Ende des Glasstabes g war die Spitze p einer Nähnadel eingeschmolzen. Wenn der Magnet länger wird, behält die Nadelspitze p, die mittelst des Glasstabes mit dem unteren Ende des Magneten in starrer Verbindung steht, relativ zu diesem Ende ihre Lage bei, während die obere Polfläche des Magneten E_2 relativ zur unteren und also auch relativ zu p sich bewegt. Diese Bewegung soll gemessen werden. Auf die Endfläche E_2 wurden zwei kleine Schneiden ss gelötet. Ueber die Nadelspitze p und die beiden Schneiden wurde eine kleine Kupferplatte k gelegt, die mittelst der Federn f auf die Schneiden sowie auf p drückte. Auf die Kupferplatte k war ein Spiegel s' geklebt, der den Bewegungen der Platte k folgen musste.

Eine eventuelle Verschiebung der Polfläche E_2 relativ zu der unteren Polfläche wird sich als eine Bewegung der Schneiden relativ zu der Spitze zeigen und ist durch die Winkelbewegung von s' zu berechnen. Der Drehungswinkel des Spiegels wächst mit der Verkürzung des Hebelarmes, der durch den Abstand der Nadelspitze von der Verbindungslinie zwischen den beiden Schneiden ss gebildet wird. Man kann diesen Hebelarm ohne grosse Schwierigkeit kleiner als 1 mm machen und auf diese Weise eine beträchtliche Empfindlichkeit erreichen.

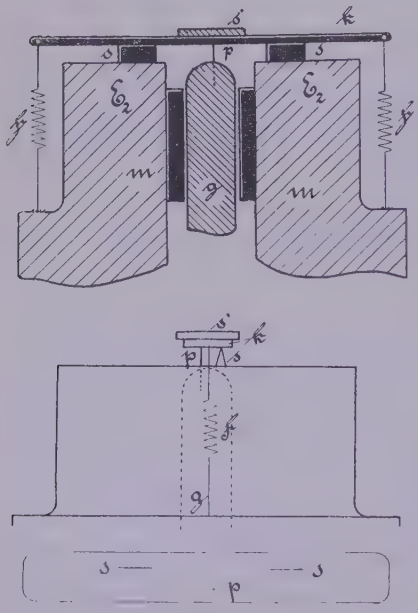


Fig. 10.

Die Winkeldrehung des Spiegels wurde durch Fernrohr und Skala gemessen. Aus praktischen Gründen war es empfehlenswert, auf die Messung des Hebelarmes zu verzichten und die absoluten Beträge der Längenänderung durch Reduktion der Beobachtungen auf drei mit dem Dilatometer erhaltene Werte zu berechnen, wie unten des Näheren ausgeführt wird. Da die Versuchsanordnungen bei der Hebelmethode einen ganz anderen Charakter haben als die bei der optischen Messung mit dem Interferometer, ist es besonders wichtig, die Ergebnisse beider Methoden zu vergleichen. Die folgende Tabelle enthält die Messungen.

Abstand $\left.\begin{matrix}\text{Fernrohr}\\ \text{Skala}\end{matrix}\right\}$ Spiegel 2,97 m.

1 Skalenteil = 2 mm.

Tabelle Nr. 9.

Nr.	Stromstärke	Verschieb.	Verlänger.
1	0 — 5	— 0,2	— 54
2	0 — 7,5	— 0,3	— 81
3	0 — 10	— 0,1	— 27
4	0 — 12,5	— 0,2	— 54
5	0 — 15	0	0
6	0 — 17,5	+ 0,1	+ 27
7	0 — 20	+ 0,3	+ 81

Tabelle Nr. 9.
(Fortsetzung)

Nr.	Stromstärke	Verschieb.	Verlänger.
8	0 — 22,5	+ 0,5	+ 135
9	0 — 25	+ 0,7	+ 189
10	0 — 27,5	+ 0,8	+ 216
11	0 — 30	+ 0,6	+ 162
12	0 — 32,5	0	0
13	0 — 35	— 0,6	— 162
14	0 — 37,5	— 1,5	— 405
15	0 — 40	— 2,2	— 594
16	0 — 42,5	— 2,6	— 702
17	0 — 45,2	— 3,2	— 864
18	0 — 48	— 3,8	—1026

Im Folgenden bedeute:

L = Abstand $\left.\begin{matrix}\text{Skala}\\ \text{Fernrohr}\end{matrix}\right\}$ Spiegel = 2,97 m.

x = Ausdehnung des Eisenstabes.

l = Skalenausschlag in mm.

α = Winkeldrehung des Spiegels.

h = Hebelarm.

Es ist:

$$l = L \cdot 2\alpha; \quad \alpha = \frac{l}{2L}$$

$$x = h\alpha.$$

Also:

$$h = \frac{x}{\alpha} = \frac{x \cdot 2L}{l} = \frac{x}{l} \cdot 2L = 5940 \cdot \frac{x}{l} \text{ mm.}$$

Hieraus findet man den Hebelarm h für irgend einen mit dem Dilatometer gemessenen Wert der Ausdehnung x. Zum Beispiel war mit dem Dilatometer gefunden bei 28 Amp. Erregerstromstärke die Ausdehnung an der Stelle des Maximums gleich 213 $\mu\mu$. Für dieselbe Stromstärke ergibt sich hier unter Anwendung des Hebels 0,8 Skalenteile (Doppelmillimeter). Demnach wird: ($x = 213 \cdot 10^{-6}$, $l = 1{,}6$ mm.)

$$h = 5940 \cdot \frac{213 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0{,}8} \text{ mm} = 0{,}87 \text{ mm.}$$

$I = 40$ Amp. $x = 610 \cdot 10^{-6}$. $l = 2 \cdot 2{,}2$. Demnach

$$h = \frac{5940 \cdot 610 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 2{,}2} = 0{,}82 \text{ mm.}$$

Endlich für $I = 45$ Amp. $x = 880 \cdot 10^{-6}$. $l = 2 \cdot 3{,}2$.

$$h = \frac{5940 \cdot 880 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3{,}2} = 0{,}81 \text{ mm.}$$

Mittel $l = 0{,}83$ mm.

In der folgenden Tabelle sind die so erhaltenen Ergebnisse nach beiden Methoden zusammengestellt.

Tabelle Nr. 10.

Stromst.	Dilatometer	Hebelmethode
5	— 98	— 54
10	— 64	— 27
15	+ 16	0
20	+ 120	+ 81
25	+ 200	+ 189
30	+ 170	+ 162
35	— 180	— 162
40	— 540	— 594
45,2	— 855	— 864

Es zeigt sich eine in Anbetracht der Schwierigkeit der Messungen recht befriedigende Uebereinstimmung. Eine bessere Uebersicht gestattet die in Fig. 16 (Seite 22) gegebene Kurvendarstellung, in welcher die Dilatometerkurve die aus den früheren Messungen erhaltene ausgeglichene Kurve darstellt. Besonders bemerkenswert ist das völlige Zusammenfallen beider Kurven für hohe Stromstärken trotz der geringeren Anzahl von Messungen nach der Hebelmethode. Dieses günstige Ergebnis ist im wesentlichen dem Umstand zu verdanken, dass im Gegensatz zu früher die Fehler sich nicht summieren.

Messungen der periodischen Verlängerungen des Eisenstabes bei Gleichstromerregung mit übergelagertem Wechselstrom.

Die kleine Kupferplatte *k* (Fig. 10) mit dem aufgeklebten Spiegel hat ein sehr kleines Trägheitsmoment, und da der durch die Federkraft ausgeübte Druck verhältnismässig gross ist, hat das System eine kleine Schwingungsdauer und eignet sich daher gut zum Messen der periodischen Ausdehnungen des Eisens bei Wechselstromerregung mit oder ohne Gleichstromerregung. Zunächst wurde die Amplitude der periodischen Ausdehnungen gemessen, wenn der Magnet mit Wechselstom mit und ohne übergelagerten Gleichstrom erregt wird.

Da der am Magneten angebrachte Spiegel unter diesen Umständen hin und her schwingt, kann eine feststehende Skala kein erkennbares Bild ins Fernrohr liefern. Es kommt in diesem Falle vielmehr darauf an, von einer feststehenden Linie, die mit der Drehungsachse des Spiegels parallel ist, ein Bild im Fernrohr zu haben. Dieses wird mit den Schwingungen hin- und hergeworfen und zeigt sich im Fernrohr wie ein Band, dessen Breite der Winkelbewegung des Spiegels entspricht. Eine Einfadenglühlampe erwies sich als für diesen Zweck geeignete Lichtquelle, da sie bei stillstehendem Spiegel als scharfe Linie im

Fernrohr erscheint, dagegen als verbreiterte Linie oder Band, wenn der Spiegel periodische Winkelbewegungen macht. Um einen Masstab für die Bandbreite zu haben, wurde eine Millimeterskala durch einen neben dem Magnetspiegel stehenden festen Spiegel ins Fernrohr reflektiert, so dass das Bild der festen Skala im Fernrohr gleichzeitig mit dem bewegten Bild des Glühfadens erscheint. Die Bandbreite konnte so unmittelbar in Skalenteilen abgelesen werden, und der Wert eines Skalenteiles in Millimetern lässt sich aus den Abständen berechnen.

Um eine periodisch schwankende Kraftlinienzahl im Magneten zu bekommen, könnte man ihn mit zwei Wickelungen versehen, von denen die eine Gleichstrom, die andere Wechselstrom führt. Derselbe Erfolg lässt sich aber durch geeignete Schaltung auch mit der einen vorhandenen Wickelung erzielen.

Für die Messungen ist es zunächst wichtig, die über einander gelagerten Gleich- und Wechselströme für sich messen zu können. Es sei die gemessene Gleichstromstärke i_g, die Wechselstromstärke i_w, und es seien Sinusströme vorausgesetzt. Dann kommt eine Erregerstrom zustande, dessen Momentanwert zwischen $i_g + \sqrt{2}\, i_w$ und $i_g - \sqrt{2}\, i_w$ variiert, wie Fig. 11 zeigt.

Im Folgenden ist darauf Wert gelegt, während einer Reihe von Messungen die Wechselstromstärke konstant halten zu können, während die Gleichstromstärke innerhalb möglichst weiter Grenzen variiert wird. Es wird angenommen, was auch spätere Messungen bestätigen, dass eine und dieselbe verschiedenen Gleichströmen übergelagerte Wechselstromstärke eine verschiedene Aenderung in der Kraftlinienzahl bewirken wird, je nachdem die Gleichstromstärke gross oder klein ist. Ist die Gleichstromstärke gross, verläuft die Magnetisierungskurve infolge der zunehmenden Sättigung an der Stelle flach; eine bestimmte Wechselstromstärke, z. B. 1 Amp., kann dann nur eine relativ kleine Aenderung in der Kraftlinienzahl bewirken. Ist die Gleichstromstärke klein, verläuft die Magnetisierungskurve an der Stelle steil, und dieselbe Wechselstromstärke wird eine grössere Schwankung in der Kraftlinienzahl bewirken. Es ist nicht ausser Acht gelassen, dass Wirbelstrombildung in dem dicken, massiven Eisenstab die Wirkung des Wechselstromes erheblich schwächt, so dass die Grenzen, innerhalb welcher die Kraftlinienzahl im Eisen schwankt, nicht nach den Stromschwankungen und der Magnetisierungskurve direkt ausgerechnet werden können.

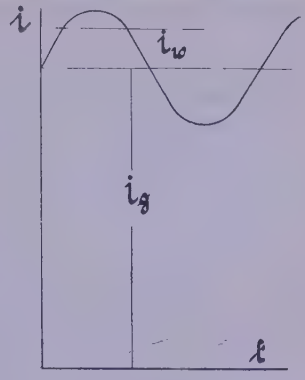


Fig. 11.

Die Erscheinung des sprechenden Magneten ist auf Ausdehnungen des Eisenstabes zurückzuführen. Wenn ein starkes Gleichstromfeld

vorhanden ist, tönt das Eisen lauter als wenn es nicht vorhanden ist, obwohl die Wechselströme verschiedener Frequenzen im ersteren Falle nicht grösser sind als im letzteren. Da hier ein Eisenstab in Bezug auf Tönen und periodische Ausdehnungen untersucht werden soll, liegt es nahe, zunächst für eine bestimmte Wechselstromstärke die periodische Ausdehnung zu messen, indem das gleichzeitig im Magneten vorhandene Magnetfeld variiert wird, d. h. indem in der Erregerwickelung des Magneten ein veränderlicher Gleichstrom fliesst, dem eine konstante Wechselstromstärke übergelagert werden kann.

Wenn die Messungen zeigen, dass unter diesen Umständen die periodischen Längenausdehnungen des Eisenstabes grösser sind, wenn ein starker Gleichstrom in der Wickelung fliesst, als wenn ein weniger starker oder gar keiner fliesst, dann ist das lautere Tönen des Magneten auf die grösseren Ausdehnungen des Eisens im ersteren Falle zurückzuführen. Diese Auffassung hat sich in der Tat bestätigt.

Nimmt man an, es sei die Wechselstromstärke in der Wickelung z. B. 1 Amp., so wird der Momentanwert des Erregerstromes zwischen ($i_g + 1{,}4$) Amp. und ($i_g - 1{,}4$) Amp. schwanken, wo i_g verschiedene Werte annehmen kann. Nach der Kurve für die Längenausdehnungen bei Gleichstromerregung können die Längen, die der Eisenstab für die Erregerströme zwischen ($i_g - 1{,}4$) Amp. und ($i_g + 1{,}4$) Amp. annimmt, bestimmt werden. Man könnte nun annehmen, dass die Momentanwerte für die Länge des Eisenstabes sich innerhalb dieser Grenzen bewegen, und könnte danach die Amplitude der Bewegungen ausrechnen. Die Messungen haben indessen diese Auffassung nicht im vollen Umfange bestätigt. Für verschiedene Periodenzahlen treten eigentümliche Messungsresultate hervor, die sich in einer später zu gebenden graphischen Darstellung der periodischen Längenänderungen am besten vergleichen lassen.

Schaltungen der Wechselstrom- und Gleichstromquelle.

1. Die für den vorliegenden Zweck einfachere Schaltung ist Hintereinanderschaltung der Wechselstrom- und Gleichstromquelle, wie sie das Schema Fig. 12 zeigt.

Im Generator G wird Wechselstrom von 50 Perioden erzeugt, dessen Spannung mittelst eines Widerstandes im Erregerstromkreise reguliert werden kann. Eine Akkumulatorenbatterie B liefert verschiedene Spannungen bis 240 Volt; mit dem Vorschaltwiderstand R wird die Stromstärke reguliert.

Die Gleichstromstärke, die durch den Magneten M geht, wird durch das Drehspulamperemeter gemessen ($= i_g$) während der Wechselstrom dadurch gemessen wird, dass der Gesamtstrom durch die Primärwickelung eines Transformators T geht, an dessen Sekundärwickelung die Spannung gemessen wird. Da die grösste Stromstärke durch die Primärwickelung 50 Amp. ist, während der Transformator für eine primäre Normallast von 200 Amp. gebaut ist, kann angenommen werden,

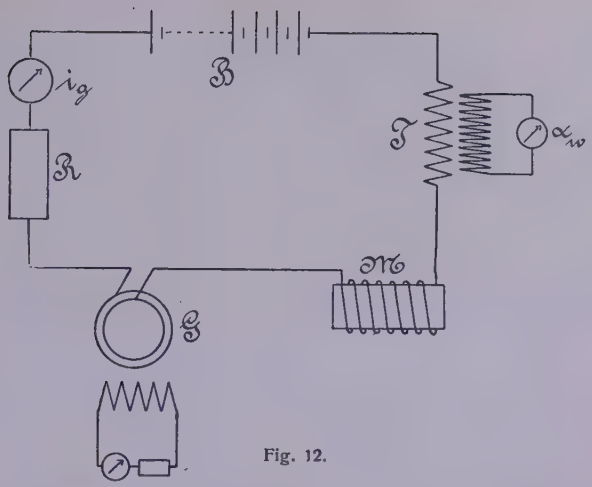


Fig. 12.

dass das Eisen so schwach gesättigt ist, dass die Spannung an den Sekundärklemmen proportional der vorhandenen primären Wechselstromstärke ist. Für die Eichung des Spannungsmessers an der Sekundärwickelung des Transformators wird die Batterie ausgeschaltet, und ein bekannter Wechselstrom wird durch den Stromkreis geleitet.

2. Parallelschaltung.

Beim Verwenden der eben beschriebenen Hintereinanderschaltung beider Stromquellen geht der ganze Wechselstrom durch die Batterie, der ganze Gleichstrom durch den Generator. Der letztere hat eine Normalleistung von 30,5 Amp., während die grösste durch ihn geschickte Gleichstromstärke 45—50 Amp. betrug. Unter diesen Umständen ist anzunehmen, dass das Eisen im Generator ausserordentlich stark gesättigt ist, und die induzierten Wechselspannungen können dann keine sinusartige Form annehmen. Die Messung der Wechselstromstärke beschränkt sich auf eine Messung des Effektivwertes, während gerade die äussersten Punkte der Momentanwerte (Maximum und Minimum) für den Versuch von Bedeutung sind.

Es kann nie vermieden werden, dass ein Teil des Wechselstromes durch die Batterie geht, und ein Teil des Gleichstromes durch den Wechselstromgenerator; durch eine geeignete Schaltung kann dagegen der durch den Generator gehende Gleichstrom auf einen gewissen Betrag beschränkt werden. Diesem Zwecke dient die Schaltung nach dem Schema der Fig. 13. Der Akkumulatorenbatterie *B* werden ein regulierbarer Widerstand *R* und eine Drosselspule *D* vorgeschaltet. Ebenso wird dem Generator *G* ein induktionsfreier Widerstand vorgeschaltet. Beide Stromquellen arbeiten parallel auf den Magneten *M* nebst dem Transformator *T*, an dessen Sekundärklemmen ein Spannungsmesser für die Wechselstrommessung angelegt ist.

Aus der Figur geht hervor, dass der aus der Batterie kommende Gleichstrom teils durch den Magneten *M* teils aber durch den Generator *G* geht. Da aber dem Generator ein Widerstand vorgeschaltet ist, der bedeutend grösser ist als der Widerstand des Magneten, wurde der durch den Generator gehende Gleichstrom auf 10—20 Amp. beschränkt. Ebenso wird der vom Generator kommende Wechselstrom zum grösseren Teil durch den Magneten gehen, da der Batterie eine sehr grosse Selbstinduktion *D* vorgeschaltet ist.

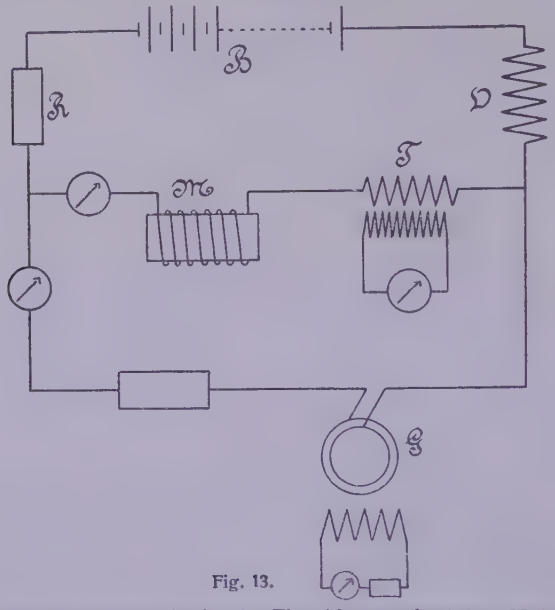


Fig. 13.

Zunächst wurde mit der in Fig. 10 angedeuteten Hebelmethode mit Anwendung der Parallelschaltung gearbeitet. Es seien:

k_w = Ausschlag des an der Sekundärwickelung des Transformators angeschlossenen Spannungsmessers (Hitzdrahtinstrument bis 6 Volt) in Skalenteilen.

i_w = Wechselstromstärke durch den Magneten.

i_g = Gleichstromstärke durch den Magneten.

b gemessene Bandbreite in Skalenteilen (Doppelmillimeter

Abstand $\left.\begin{matrix}\text{Fernrohr}\\ \text{Skala}\end{matrix}\right\}$ — Spiegel = 3 m).

Abstand der Einfadenlampe vom Spiegel 3 m.

Aus den Abständen folgt, dass 0,1 Skalenteile 27 $\mu\mu$ Ausdehnung des Eisenkernes entsprechen.

Die Bestimmung der absoluten Grösse des Wechselstromes wurde vorgenommen durch Ausschaltung der Gleichstromquelle unter Beobachtung der Wechselstromstärke i_w und der Sekundärspannung k_w am Transformator *T*. Die Eichung ergab:

Tabelle Nr. 11.

Nr.	i_w	k_w
1	1,45	50
2	1,95	70
3	2,3	100
4	2,8	120
5	3,4	150

Im folgenden werden zwei Messungsreihen für wachsende Gleichstromerregung des Magneten bei konstant gehaltenem übergelagertem Wechselstrom mitgeteilt, indem die Frequenz des Wechselstromes = 53 angewendet wird.

Tabelle Nr. 12a.

Nr.	i_g	k_w	b	dl in $\mu\mu$	i_w
1	0	82	0	0	2,1
2	11	82	0,2	54	2,1
3	20	82	0,2	54	2,1
4	25	82	0,2	54	2,1
5	30	74	0,8	216	2,0

Tabelle Nr. 12b.

Nr.	i_g	k_w	b	dl in $\mu\mu$	i_w
1	0	50	0	0	1,45
2	11	50	0,3	81	1,45
3	20	50	0,3	81	1,45
4	25	50	0,2	54	1,45
5	28	50	0,2	54	1,45
6	33	50	0,6	162	1,45
7	36	50	1,0	270	1,45
8	39	50	1,1	297	1,45
9	43	48	0,8	216	1,45

Aus diesen beiden Messungsreihen ergibt sich mit auffälliger Deutlichkeit ein erhebliches Anwachsen der periodischen Ausdehnung des Eisenstabes bei zunehmendem Gleichstromfeld.

Beim Uebergang von jeder Messung zur nächsten wurde auf die damit verbundene Aenderung des Tönens besonders geachtet. Es ist anfangs kaum hörbar und wächst wie die Verlängerung mit steigender Gleichstromerregung beständig an. Eine besonders starke Zunahme findet sich beim Uebergang von etwa 30 Amp. auf etwa 40 Amp. Gleichstrom, genau so wie es erwartet werden muss auf Grund der früher bestimmten Kurven für die Grösse der Längenänderung.

Die Genauigkeit dieser Messungen ist nicht sehr gross, wenn auch das wesentliche Resultat dadurch in keiner Weise in Frage gestellt wird. Die Ablesung der Bandbreite im Fernrohr ist kaum auf 0,1 Skalenteile sicher, d. h. da 0,1 Skalenteile 27 $\mu\mu$ entsprechen, können die Resultate nicht genauer als auf etwa 30 $\mu\mu$ angegeben werden. Es liegt in der Natur der Sache, dass man mit der Grösse des Hebelarmes bei der verwendeten Anordnung nicht beliebig heruntergehen kann. Andererseits wäre eine grössere Genauigkeit doch wünschenswert. Es ist daher von einer weiteren Benutzung des Apparates Abstand genommen und eine neue Anordnung gewählt. Diese ist im folgenden beschrieben.

Schneidenhebel-Apparat.

Auf eine dicke Grundplatte G aus Messing (Fig. 14) ist eine Messingsäule mit einem Ausläufer S gelötet, so dass die beiden Teile

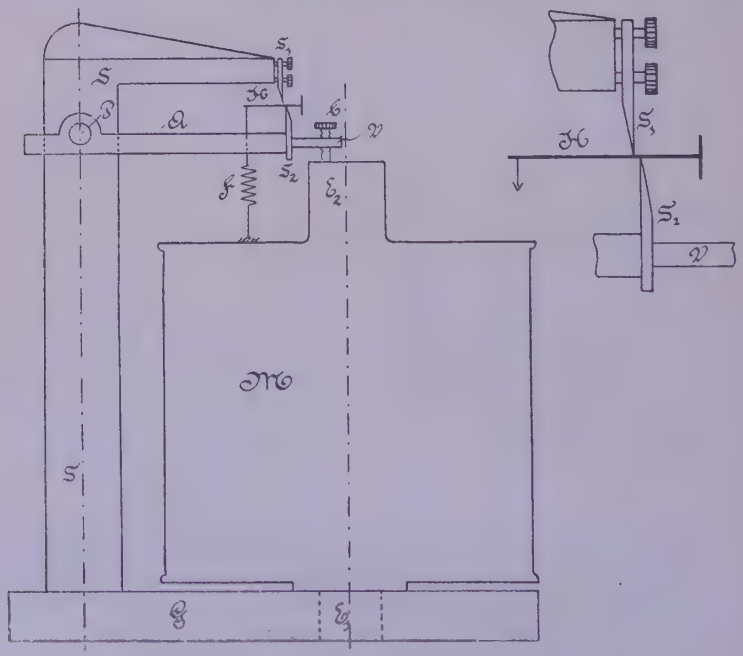


Fig. 14.

in starrer Verbindung stehen. In der Grundplatte ist eine Bohrung, so dass der Magnet M mit seinem unteren Eisenzylinder E_1 hineingeschraubt werden kann. Auf dem Ausläufer ist eine Schneide s_1 aus Neusilber angebracht, die relativ zu E_1 unveränderliche Lage hat.

Gegenüber der Schneide s_1 befindet sich eine zweite s_2, die den Bewegungen des anderen Endes E_2 des Magneten folgen soll. Zu diesem Zweck ist die Schneide s_2 auf einem Messingrahmen A festgemacht, der die Messingsäule S ringförmig umfasst und mittelst zweier Schrauben um den an der Messingsäule festen Punkt P drehbar ist. Der Messingrahmen A ruht durch eine Schraube b und ein Verbindungsstück V auf dem oberen Magnetpol E_2. Zwischen den beiden Schneiden ist der eigentliche Hebel H, eine kleine dünne Metallplatte, die einen Spiegel trägt, angebracht. Dabei wird der Hebel H durch eine Spiralfeder f gegen beide Schneiden angedrückt. Die Länge des Hebelarmes wird lediglich durch den horizontalen Abstand der Schneiden s_1 s_2 bestimmt und ist veränderlich, indem die Schneide s_1 durch drei Stellschrauben nach links oder rechts verstellt werden kann.

Die Wirkungsweise des Apparates ist folgende: So lange die Länge des Magneten unverändert bleibt, behält der Hebel seine Stellung. Wenn das Magneteisen sich dagegen aus irgend einem Grunde ausdehnt, muss die Schraube b, die durch das Gewicht des Messingrahmens A und durch das von der Spiralfeder f ausgeübte Drehmoment mit konstantem Druck auf dem Magneten ruht, sich nach oben bewegen. Damit bewegt sich aber auch die Schneide s_2, während die Schneide s_1 ihre Lage behält. Die Spiralfeder f muss nachgeben, der Hebel H dreht sich, und der Drehungswinkel kann durch den aufgeklebten Spiegel mit Fernrohr und Skala gemessen werden, indem wie früher eine Einfadenglühlampe als Lichtquelle in einem gemessenen Abstande vom Spiegel angebracht wird. Da die Schneiden eine Länge von 20 mm haben, können sie einen bedeutenden Druck auf den Hebel ausüben und sind somit für die Wiedergabe schnell verlaufender periodischer Längenänderungen sehr geeignet. Ein Mikroskop ermöglicht eine zuverlässige Messung der Länge des Hebelarmes h, da die einander zugewandten Seiten der Schneiden vollständig gerade gemacht sind.

Wenn der Magnet mit Wechselstrom mit oder ohne übergelagerten Gleichstrom gespeist wird, ändert der Spiegel fortwährend seine Stellung, indem jede Spiegellage einer gewissen Eisenlänge bzw. einer gewissen Kraftlinienzahl im Eisen entspricht. Im Fernrohr erscheint das Bild der Einfadenlampe als eine scharfe Linie, wenn der Spiegel sich nicht bewegt, dagegen als ein Band, wenn der Spiegel sich schnell hin und her dreht. Um eine genaue Messung der Bandbreite möglich zu machen, wurde das Fernrohr mit einem Okularmikrometer versehen. Das Band erscheint dann direkt auf der Mikrometerskala. Die absoluten Werte der periodischen Längenänderungen wurden zunächst nach den früher gefundenen Längenausdehnungen für Gleichstrom berechnet.

Die Messungen der Längenausdehnung bei Gleichstromerregung sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. i_g bedeutet die Gleichstromstärke, dA die Anzahl Skalenteile, um welche das Bild des Glühfadens beim Einschalten der Erregung wandert.

Tabelle Nr. 13.

Nr.	i_g	dA	Nr.	i_g	dA
1	3,7	— 0,5	8	27	+ 1,5
2	7	— 0,7	9	30	+ 1,3
3	10	— 0,4	10	33,2	+ 0,2
4	13	0	11	37	— 0,8
5	16,5	+ 0,2	12	41	— 2,6
6	20	+ 0,8	13	45,5	— 4,5
7	23	+ 1,2			

Auf Grund der früheren Messungen mit dem Interferometer folgt hieraus, dass ein Skalenteil bei der hier gewählten Anordnung einer Verlängerung von 150 $\mu\mu$ entspricht.

Die Messung der periodischen Längenänderungen des Magneten bei Gleichstromerregung mit übergelagertem Wechselstrom wurde unter Benutzung der Hintereinanderschaltung beider Stromquellen (Fig. 12) für die Periodenzahlen 53 und 24 ausgeführt. Der übergelagerte Wechselstrom wird dadurch gemessen, dass der Gesamtstrom (Gleich- und Wechselstrom) durch eine Drosselspule geht, die kein Eisen enthält. An der Sekundärwicklung der Drosselspule ergaben die induzierten elektromotorischen Kräfte in einem angeschlossenen Wechselstromgalvanometer (Bellati-Kipp) einen Ausschlag α_w, der für jede Messungsreihe konstant gehalten wird. Die absolute Grösse der Wechselstromstärke findet sich durch Ablesung eines geeichten Strommessers bei ausgeschaltetem Gleichstrom.

Die folgenden Tabellen enthalten die Messungen. Es bedeutet:

i_g = Gleichstromstärke.

α_w = Ausschlag des Wechselstromgalvanometers.

i_w = Wechselstromstärke, welche vor und nach jeder einzelnen Reihe kontrolliert wurde.

n = Periodenzahl.

db = Bandbreite in Skalenteilen. Da man nur die äusseren Ränder scharf ablesen kann, muss von allen Zahlen die Breite des Glühfadens = 0,8 Skalenteile abgezogen werden.

dl = Periodische Längenänderung in $\mu\mu$.

Die Tonstärke ist nach einer willkürlichen Skala von 0 bis 4 geschätzt.

Tabelle Nr. 14. $n = 53$, $\alpha_w = 54$, $i_w = 1{,}8$ Amp.

Nr.	i_g	db	Tonstärke	dl
1	0	1,0	0	30
2	3	1,0	0	30
3	7	1,7	0	135
4	10,5	1,7	0	135

Tabelle Nr. 14. $n = 53$, $\alpha_w = 54$, $i_w = 1{,}8$ Amp.
(Fortsetzung.)

Nr.	i_g	db	Tonstärke	dl
5	14	2	0	180
6	17,7	2,2	1	210
7	21	2,5	2	255
8	24,5	3	2	330
9	28	3,2	3	360
10	32	3,8	3	450
11	36	4,2	3	510
12	40	5,0	4	630

Tabelle Nr. 15. $n = 24$, $\alpha_w = 10$, $i_w = 2{,}0$ Amp.

Nr.	i_g	db	Tonst.	dl	Nr.	i_g	db	Tonst.	dl
1	0	0,8	0	0	9	24	1,8	0	150
2	3	0,8	0	0	10	26	1,7	0	135
3	6	0,8	0	0	11	29	2,0	0	180
4	9	0,8	0	0	12	32	2,2	0	210
5	11,7	1,0	0	30	13	35	2,7	0	286
6	15	1,1	0	45	14	41	3,0	0	330
7	18	1,3	0	75	15	45	2,8	0	300
8	21	1,3	0	75					

Auf Parallelschaltung beider Stromquellen nach dem Schema der Fig. 13 bezieht sich die folgende Messungsreihe.

Tabelle Nr. 16. $n = 53$, $\alpha_w = 67$, $i_w = 1{,}8$ Amp.

Nr.	i_g	db	Tonst.	dl	Nr.	i_g	db	Tonst.	dl
1	0	1,2	0	40	9	24	3,0	3	220
2	3	1,2	0	40	10	27	3,0	3	220
3	6	1,5	1	70	11	30	3,0	3	220
4	9	2,0	1	120	12	33	3,7	3	290
5	12	2,0	1	120	13	36	3,8	4	300
6	15	2,3	1	150	14	40	3,8	4	300
7	18	2,7	2	190	15	44	3,3	4	250
8	21	3,0	2	220					

Der Wert eines Skalenteiles ergibt sich für diese letzte Reihe aus folgenden Gleichstrommessungen:

Tabelle Nr. 17.

Nr.	i_g	dA	Nr.	i_g	dA
1	4,5	— 0,5	9	25	+ 2,0
2	8	— 0,7	10	28	+ 2,0
3	10	— 0,2	11	32	+ 0,2
4	12	+ 0,2	12	35	— 1,8
5	14	+ 0,4	13	39	— 4,3
6	16	+ 1,0	14	42	— 6,8
7	19	+ 1,5	15	45	— 7,5
8	22	+ 1,5			

Daraus folgt: 1 Skalenteil = 100 $\mu\mu$ Längenänderung.

Man erkennt, dass die Beobachtungen bei hintereinander geschalteten Stromquellen etwas grössere Werte geben als die bei Parallelschaltung, aus dem früher angegebenen Grunde.

Um Uebereinstimmung mit den Verhältnissen beim sprechenden Magneten zu bekommen, erschien es auch wertvoll, Wechselströme zu wählen, die in der Frequenz und Stromstärke nicht all zu sehr von den Mikrophonströmen abweichen, d. h. bis 400 Perioden und bis ca. 1 Amp. Zu solchen Messungen ist indessen die hier vorhandene Empfindlichkeit nicht ausreichend. Um sie zu steigern, wurde das Ablesefernrohr (ein

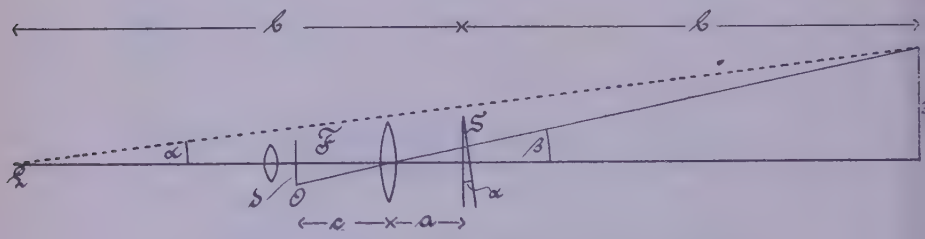


Fig. 15.

Edelmannsches Instrument mit 50 cm Objektivbrennweite) durch ein astronomisches Fernrohr mit etwa 125 cm Brennweite ersetzt. Gleichzeitig wird eine andere Galvanometeraufstellung gewählt, von der Fig. 15 ein schematisches Bild gibt. Es sei:

F = ein Fernrohr, o = dessen Okularmikrometer.

S = ein Spiegel, dessen Winkeldrehung α zu bestimmen ist.

L die Lichtquelle, deren Spiegelbilder sich in L_1 oder L_2 befinden, je nachdem $\alpha = 0$ oder $\alpha = \alpha$ ist.

β = der Winkel, unter dem L_1 L_2 in F erscheint.

c = Bildweite = 1,35 m.

a = Abstand Objektiv—Spiegel = 2,10 m.

b = Abstand Lichtquelle—Spiegel = 27,5 m.

d = Ablesung am Okularmikrometer.

Es ist (Fig. 15):

$$\beta = \frac{x}{a+b} \text{ wo } x = L_1 L_2$$

$$d = c \,.\, \beta;\; x = 2b\alpha, \text{ d. h.}$$

$$d = c \,.\, \beta = \frac{c \,.\, x}{a+b} = \frac{2bc\alpha}{a+b} = 2c\alpha \,.\, \frac{b}{a+b}$$

d. h., da c und α gegeben sind, die Empfindlichkeit wird möglichst gross, wenn b gross und a klein gemacht wird. Bei der gebräuchlichen Fernrohraufstellung ist $a = b$ und daher $\frac{b}{a+b} = {}^1/_2$; hier dagegen ist $\frac{b}{a+b}$ nahe $= 1$ und daher im Grenzfalle die Empfindlichkeit doppelt so gross.

Direkt beobachtet wird die Bandbreite im Fernrohr in Skalenteilen. Für die Eichung des Okularmikrometers genügt eine einmalige Aufstellung einer Skala in L, deren Bild im Fernrohr mit der Teilung des Okularmikrometers verglichen wird:

Glühfaden 32 mm lang in L entspricht bei dieser Entfernung zufällig 32 Skalenteilen am Okularmikrometer. Die Figur ergibt:

$$\alpha = \frac{x}{2b} = \frac{d}{2b} = \frac{d}{55000} \overset{\text{(Skalenteile)}}{=} 1{,}92 \,.\, 10^{-5} \,.\, d.$$

Der Hebelarm h wurde mit dem Mikroskop zu 0,57 mm gemessen, d. h. die wirkliche Verschiebung dl ist:

$$dl = h \,.\, \alpha = 0{,}57 \,.\, 1{,}92 \,.\, 10^{-5} \,.\, d = 10{,}4 \,.\, 10^{-6} \,.\, d.$$

Die Verlängerung ist demnach 10,4 $\mu\mu$ pro beobachteten Skalenteil, oder gegenüber den Beobachtungen der Tabelle Nr. 13 (Seite 34) ist die Empfindlichkeit auf das fünfzehnfache gesteigert.

Die Berechnung der Amplitude geschieht somit folgendermassen: Von der beobachteten Bandbreite db wird zunächst die Breite des Glühfadens bei ruhendem Spiegel db_0 abgezogen; die Differenz multipliziert mit der Konstante $10{,}4 \,.\, 10^{-6}$ gibt die gesuchte periodische Ausdehnung dl.

Im folgenden sind Messungsreihen für Parallelschaltung (Schema Fig. 13) mitgeteilt für die Frequenzen 24, 53, 103, 235 und 400. Da der Magnet einen sehr hohen induktiven Widerstand hat, der proportional der Periodenzahl wächst, so kann man bei hohen Frequenzen die Wechselströme von 1 Amp. nicht mehr erreichen, die Messungen wurden mit 0,44 Amp. Wechselstrom ausgeführt. Auch erwärmt sich der Magnet infolge der stark wachsenden Wirbelstromverluste dann so sehr, dass die Sicherheit der Beobachtungen stark beeinträchtigt wird. Des Vergleiches wegen sind daher bei den höheren Frequenzen die Werte der Verlängerung für 1 Amp. durch Division der Beobachtungen mit 0,44 in einer besonderen Kolonne aufgeführt.

Tabelle Nr. 18. $n = 24$, $\alpha_w = 35$, $i_w = 1$ Amp.

Nr.	i_g	db	dl (in $\mu\mu$)	Nr.	i_g	db	dl (in $\mu\mu$)
1	0	3,5	10	20	22	12	99
2	1	3,5	10	21	23,2	12	99
3	2	3,5	10	22	24	12	99
4	3	3,5	10	23	25	9	68
5	4,2	3	5	24	25,3	8	57
6	6	4	16	25	26,2	7	47
7	7	5	26	26	27	7	47
8	8	5	26	27	28	5,5	31
9	9	5	26	28	29	7	47
10	10	6	36	29	30	7	47
11	11	6	36	30	31	9	68
12	12,3	6	36	31	32	10	78
13	13,7	6,5	42	32	33	10	78
14	14,8	6,5	42	33	34	12	99
15	15,8	7	47	34	36	15	130
16	17,0	8	57	35	38	18	161
17	18,2	9	68	36	40	18	161
18	19,2	11	88	37	42	16	140
19	20,2	12	99				

Tabelle Nr. 19. $n = 53$, $\alpha_w = 30$, $i_w = 1$ Amp.

Nr.	i_g	db	dl	Nr.	i_g	db	dl
1	0	3	5	20	22,8	8	57
2	1,2	3	5	21	24	8,5	62
3	2,0	3	5	22	25	8	57
4	3,2	3	5	23	26	8	57
5	4,2	3	5	24	27	10	78
6	6	3,5	10	25	28,3	11	88
7	7,5	4	16	26	29,2	11,5	94
8	8,8	4,5	21	27	30,3	13	109
9	9,7	5,5	31	28	31,7	13,5	114
10	10,3	6	36	29	32,7	13,5	114
11	11,7	6	36	30	33,7	14	120
12	13	6,5	42	31	33,5	13	109
13	14	6,5	42	32	34	13,5	114
14	15,6	7	47	33	35	14	120
15	17	7,5	52	34	37	14	120
16	18,3	8,5	62	35	39	14	120
17	19,7	9	68	36	41,5	14	120
18	20,5	8	57	37	43	14	120
19	21,7	8	57				

Tabelle Nr. 20. $n = 103$, $i_w = 0{,}44$ Amp.

Nr.	i_g	db	dl	$\frac{dl}{0{,}44}$	Nr.	i_g	db	dl	$\frac{dl}{0{,}44}$
1	0	2,5	0	0	15	16,2	12,5	104	237
2	2,3	3	5	11	16	18	13	109	248
3	3	3,5	10	23	17	19,2	11,5	94	214
4	4	4	16	36	18	20,6	13	109	248
5	5	5	26	59	19	22,3	14,5	125	285
6	6	5	26	59	20	24	14	120	273
7	7	5,5	31	70	21	26,2	14	120	273
8	8	5,5	31	70	22	28,2	13,5	115	262
9	9	6	36	82	23	30,2	13	109	248
10	10	7	47	107	24	33,2	13	109	248
11	11	7	47	107	25	36	13	109	248
12	12,3	8,5	62	141	26	39	13	109	248
13	13,8	10	78	178	27	43	13	109	248
14	15	11	88	200					

Tabelle Nr. 21. $n = 235$, $a_w = 64$, $i_w = 0{,}44$ Amp.

Nr.	i_g	db	dl	$\frac{dl}{0{,}44}$	Nr.	i_g	db	dl	$\frac{dl}{0{,}44}$
1	0	2,5	0	0	16	17,4	6,5	41	93
2	2,2	2,5	0	0	17	18,6	6,5	41	93
3	3	3	5	11	18	19,6	7	47	107
4	4,2	3	5	11	19	20,8	7	47	107
5	5	3	5	11	20	22	7	47	107
6	6	3,5	10	23	21	23	7	47	107
7	7	4	16	36	22	24,3	7	47	107
8	8	4,5	21	48	23	26	6,5	41	93
9	9	4,5	21	48	24	28	6	36	82
10	10	5	26	59	25	30,1	6	36	82
11	11	5	26	59	26	32	5,5	31	70
12	12,2	5,5	31	70	27	34,2	6	36	82
13	13,8	6	36	82	28	35,8	6	36	82
14	15	6	36	82	29	38	6	36	82
15	16,2	6	36	82	30	40	5,5	31	70

Tabelle Nr. 22. $n = 400$, $a_w = 15$, $i_w = 0{,}44$ Amp.

Nr.	i_g	db	dl	$\frac{dl}{0{,}44}$	Nr.	i_g	db	dl	$\frac{dl}{0{,}44}$
1	0	2,5	0	0	6	10,2	5	21	48
2	6	3,5	5	11	7	11,3	5	21	48
3	7	4	10	23	8	13,0	5,5	26	59
4	8,2	4,5	16	36	9	14,4	5,5	26	59
5	9,1	4,5	16	36	10	16,0	6,5	36	82

Tabelle Nr. 22. $n = 400$, $a_w = 15$, $i_w = 0{,}44$ Amp.

(Fortsetzung.)

Nr.	i_g	db	dl	$\frac{dl}{0{,}44}$	Nr.	i_g	db	dl	$\frac{dl}{0{,}44}$
11	17,2	6	31	70	21	31,2	3,5	10	23
12	18,8	6,5	36	82	22	32,0	4	16	36
13	20,1	7	41	93	23	32,4	3,5	10	23
14	21,3	7	41	93	24	34,2	4	16	36
15	22,7	7	41	93	25	36	4,5	21	48
16	24,0	6	31	70	26	37,5	4	16	36
17	25,0	5	21	48	27	39	4	16	36
18	27,2	4,5	16	36	28	42	4,5	21	48
19	28,8	4,5	16	36	29	45	4,5	21	48
20	30,0	4	10	23					

Aus den Tabellen, deren Zahlenwerte in der Kurvendarstellung auf Fig. 17 leichter zu überblicken sind, sieht man, dass die Längenänderungen bei der Periodenzahl $n = 103$ wesentlich höhere Werte aufweisen als in den übrigen Beobachtungsreihen, was sehr wahrscheinlich in Resonanzerscheinungen am Apparate seinen Grund hat. Die einzelnen Kurven zeigen sonst eine gewisse Gleichmässigkeit in ihrem Verlaufe. Das in ihnen erhaltene Hauptresultat lässt sich folgendermassen zusammenfassen:

Die Amplitude der periodischen Längenänderungen des Eisenstabes, welche die angewandte feste Wechselstromstärke erzeugt, wird ausserordentlich vergrössert, wenn im Magneteisen neben dem Wechselfelde ein starkes Gleichfeld vorhanden ist. Schon die unmittelbar zu ersehende Tatsache, dass für alle benutzten Frequenzen sich die Kurven mit wachsender Gleichstromerregung überhaupt über die Nullinie erheben, ist ein Beleg für das ausgesprochene Ergebnis. Dieses Verhalten entspricht demnach vollständig unserer früher beschriebenen Grunderscheinung, nach der das Tönen eines Magneten bei gleichzeitiger Gleichstromerregung ausserordentlich anwächst.

Die Erscheinung ist ihrem allgemeinen Charakter nach die gleiche für alle untersuchten Periodenzahlen, wenn sich auch im einzelnen mannigfache Unterschiede herausstellen, welche noch zu diskutieren sind. Der absolute Wert der Zunahme der Längenänderung durch denselben Wechselstrom mit wachsendem Gleichfeld lässt sich nur angenähert bestimmen, da dl, wie der Anfang der Kurve zeigt, für schwaches Gleichfeld ausserordentlich klein und daher nur ungenau messbar ist. Setzen wir, wie es sich aus der Kurve ergibt, die Verlängerung ohne Gleichfeld gleich 10 $\mu\mu$, und sehen wir ausserdem noch ab von der ganz ausserordentlichen Steigerung, die in der Kurve für $n = 103$ wie oben erwähnt infolge einer Resonanzerscheinung auftritt, so ergeben die übrigen Kurven für kleine Periodenzahlen ein Anwachsen von dl auf den sechzehnfachen Betrag am Punkte des Maximums. Bei

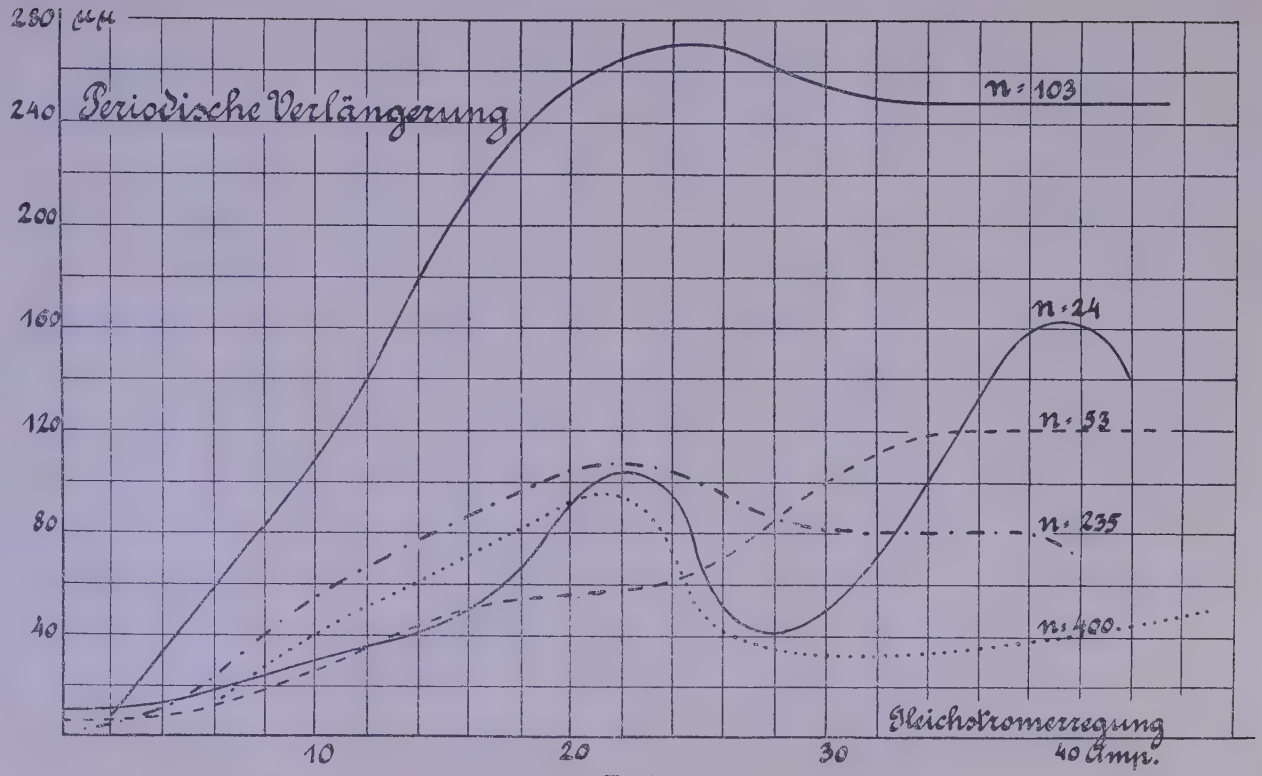

280 µµ
240
200
160
120
80
40
Periodische Verlängerung
n = 103
n = 24
n = 53
n = 235
n = 400
10
20
30
Gleichstromerregung
40 Amp.

Fig. 17.

den höheren Periodenzahlen ist infolge der grösseren Wirbelstrombildung der veränderliche Teil der Kraftlinienzahl kleiner, und daher das relative Anwachsen der Verlängerung mindestens ebenso gross, wahrscheinlich sogar bedeutender (siehe weiter unten).

Es ist schon erwähnt worden, dass die Vermutung nahe liegt, dass die Länge des Eisenstabes zu jeder Zeit der momentanen Kraftlinienzahl entspricht, dass somit die Kurve für die periodischen Ausdehnungen durch Wechselstrom mit oder ohne übergelagerten Gleichstrom aus der Kurve für die Ausdehnung bei Gleichstromerregung allein entnommen werden kann, wenn die äusseren Grenzen der Kraftlinienzahl bekannt sind. Die periodischen Ausdehnungen sind indessen viel grösser als man nach der Aenderung im Kraftflusse zu erwarten hätte, was auch *Honda* und *Shimizu*[1] bemerkt haben. Um einen Ueberblick über diese Verhältnisse zu gewinnen, ist es notwendig, die Magnetisierungskurve und den veränderlichen Teil des Kraftflusses zu bestimmen, was im folgenden geschieht.

Da bei dem vorliegenden dicken Eisenstab das Feld des Wechselstromes durch Wirbelströme sehr geschwächt wird, und da nicht ohne weiteres angegeben werden kann, ob ein schon vorhandenes Gleichstromfeld auf diese Schwächung durch Wirbelströme einwirkt, wurden die Grenzen bestimmt, innerhalb welcher die Kraftlinienzahl schwankt bei konstanter Wechselstromerregung, aber verschiedenen Gleichstromfeldern. Dazu wird zunächst die Feldstärke in ihrer Abhängigkeit vom Erregerstrom gemessen.

Auf die obere Fläche des Magneteisens wurde eine aus 50 Windungen bestehende Prüfspule mit 31,2 cm² Querschnitt gelegt. Die Kraftlinienzahl beim Ein- und Ausschalten der Erregerstromstärke wurde durch ein ballistisches Galvanometer von Siemens und Halske mit 10000 Ohm Widerstand gemessen. Auf- und absteigender Zweig der Hysteresisschleife liegen sehr nahe zusammen.

Absteigender Strom von + 44 Amp. bis — 44 Amp. Galvanometerkonstanten: Dämpfungsverhältnis im Stromkreise mit Gesamtwiderstand 200000 Ohm 1,264. Ungedämpfte Schwingungsdauer 6,8 Sek. Stromkonstante 5,29 . 10 - 9. Ballistische Konstante 12,18 . 10 - 9. Es betrug die Kraftlinienzahl pro cm²:

Tabelle Nr. 23.

bei Amp.	*B*	bei Amp.	*B*	bei Amp.	*B*
44	16600	10,3	5000	21	9700
34	15000	6,3	3100	25	11500
29	13200	0	300	29	12800
25	11600	— 6,3	— 2800	33	14300
17,3	8100	10,2	4700	38	15200
14	6760	14	6400		

[1] Phil. Mag. VI. 4, 645, 1902.

Fig. 18 gibt eine Darstellung des Ergebnisses.

Nunmehr wird der veränderliche Teil der Kraftlinienzahl durch die an derselben Spule induzierte Spannung gemessen, wenn der Magnet mit einer konstanten Wechselstromstärke und einem veränderlichen übergelagerten Gleichstrom erregt wird.

Durch einen Umschalter wurde mit demselben Wechselstromgalvanometer von Bellati-Kipp sowohl die Wechselstromstärke i_w wie auch die induzierte elektromotorische Kraft e_p an der Prüfspule gemessen. Der Galvanometerausschlag bei eingeschalteter Prüfspule a_p wurde gleich e_p (Messung der Wechselstromstärke siehe Seite 34) gemacht,

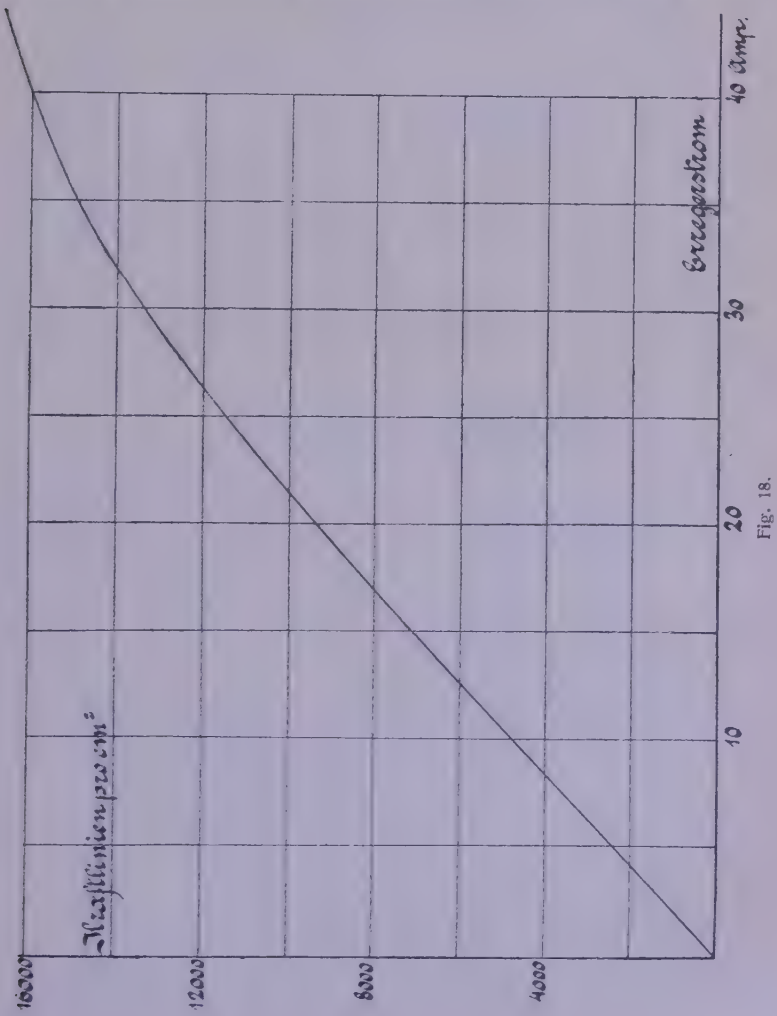


Fig. 18.

indem der Prüfspule ein regulierbarer Widerstand p vorgeschaltet war. Die Stromstärke im Galvanometer bei dem Ausschlag α_p wurde gemessen, und danach die in der Prüfspule induzierte elektromotorische Kraft gleich Strom mal Widerstand berechnet, da Kontrollversuche zeigten, dass der induktive Widerstand im Galvanometer für die Messung ohne Bedeutung war.

Gemessen: Galvanometer-Widerstand 111 Ohm,
Prüfspule-Widerstand 3,7 Ohm.

Die Stromstärke durch das Wechselstromgalvanometer ist für den angewendeten Ausschlag α_p — 10 Skalenteile mit einem geeichten Hitzdrahtvoltmeter bestimmt worden; sie betrug für

$n = 53$ $\quad 1{,}54 \cdot 10^{-3}$ Amp.
$n = 235$ $\quad 1{,}38 \cdot 10^{-3}$ Amp.

In den folgenden beiden Tabellen bedeutet:

i_g = Gleichstromstärke.

e_p = Induzierte elektromotorische Kraft in der Prüfspule, proportional dem veränderlichen Teil der Kraftlinienzahl.

p = Vorschaltwiderstand, der nötig ist, um bei der Messung der induzierten elektromotorischen Kraft e_p in der Prüfspule den Galvanometerausschlag auf den konstanten Wert von 10 Skalenteilen zu bringen. ($\alpha_w = 10$ Skalenteile.)

Die Berechnung des variablen Teiles der Kraftlinienzahl wurde unter Voraussetzung sinusförmiger Ströme folgendermassen durchgeführt. Ist:

m = Windungszahl der Prüfspule = 50
dB = Variabler Teil der Kraftlinien
q = Querschnitt der Prüfspule = 31,2 cm²

so ist:

$$e_p = 44{,}4 \; dB \cdot q \cdot m \cdot n \cdot 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Bei Sinusströmen ist:

$dB_{max} = 1{,}4 \cdot dB$ (äussere Grenzen), also

$$dB_{max} = \frac{1{,}4 \cdot e_p \cdot 10^8}{4{,}44 \cdot q \cdot m \cdot n} = 20{,}2 \cdot 10^3 \cdot \frac{e_p}{n}$$

Die so berechneten Werte enthält die letzte Kolonne.

Tabelle Nr. 24. Periodenzahl $n = 53$, $i_w = 1$ Amp.

Nr.	i_g	p	e_p	dB_{max}
1	0	181	0,46	176
2	1,7	187	0,47	180
3	2,3	194	0,48	183
4	3,3	199	0,48	183
5	4,8	200	0,49	187
6	5,3	195	0,48	183
7	6,6	195	0,48	183
8	7,7	189	0,47	180

Tabelle Nr. 24. Periodenzahl $n = 53$, $i_w = 1$ Amp.
(Fortsetzung.)

Nr.	i_g	p	e_p	dB_{max}
9	8,6	198	0,48	183
10	11	190	0,47	180
11	13,8	185	0,46	176
12	16,8	183	0,46	176
13	19,3	177	0,45	172
14	21,5	162	0,43	164
15	24,2	145	0,40	153
16	26,2	122	0,37	141
17	28,8	82	0,30	114
18	32	52	0,26	99
19	35,8	30	0,22	85
20	38,6	12	0,196	75
21	42	0	0,177	68

Tabelle Nr. 25. Periodenzahl $n = 235$, $i_w = 1$ Amp.

Nr.	i_g	p	e_p	dB_{max}
1	0	175	0,40	34,4
2	2,3	190	0,42	36
3	3	195	0,43	37
4	3,9	192	0,42	36
5	5	190	0,42	36
6	6	187	0,42	36
7	7,3	180	0,41	35
8	9	173	0,40	34
9	10,9	173	0,40	34
10	12,2	175	0,40	34
11	13,3	175	0,40	34
12	15	167	0,39	33,5
13	16	169	0,39	33,5
14	17	165	0,39	33,5
15	18,2	162	0,38	33
16	19,8	152	0,37	32
17	21,2	152	0,37	32
18	23	142	0,35	30
19	24,6	132	0,34	29
20	27	102	0,30	26
21	29	68	0,25	21,5
22	31	45	0,22	19
23	34	25	0,19	16,3
24	38	12	0,175	15
25	39,2	4	0,164	14

Aus den Tabellen sieht man, dass der veränderliche Teil der Kraftlinienzahl mit wachsender Feldstärke abnimmt. Der gleiche Schluss lässt sich aus dem flacheren Verlauf der Magnetisierungskurve für grosse Erregerstromstärken ziehen.

Es soll nun ein Vergleich der beobachteten periodischen Längenänderungen mit den nach der Kraftlinienänderung zu erwartenden Längenänderungen durchgeführt werden. Wir wählen folgendes Beispiel:

In der Beobachtungsreihe Tabelle Nr. 25 (Seite 45) findet man bei einer Periodenzahl $n = 235$ für eine Erregerstromstärke $i_g = 23$ Amp. $i_w = 1$ Amp. $dB_{max} = 30$. Nach der Kurve für die Kraftlinienzahl in ihrer Abhängigkeit von der Erregerstromstärke (Fig. 16) findet man die zugehörige Kraftlinienzahl bei 23 Amp. $B = 11000$. Für diesen Punkt ist für $dB_{max} = 30$ nach beiden Seiten eine Verlängerung von $3\mu\mu$, während die beobachteten periodischen Verlängerungen, Tabelle Nr. 21 (Seite 39) für $i_w = 0{,}44$ Amp. $47\mu\mu$ sind, d. h. für $i_w = 1$ Amp. wäre der Betrag $\frac{dl}{0{,}44} = 107\mu\mu$ oder 30 mal grösser als die berechnete Verlängerung.

Für die periodischen Längenänderungen eines Eisenstabes bei periodisch schwankender Kraftlinienzahl scheinen demnach zwei Faktoren von Bedeutung zu sein: 1. Die Grösse der Längenänderung bei Gleichstromerregung und die durch die schwankende Kraftlinienzahl verursachte periodische Verlängerung. Wie oben erwähnt ist diese klein gegenüber der gemessenen periodischen Verlängerung. 2. Ein mit steigender Periodenzahl des übergelagerten Wechselstromes wachsender Faktor, der die unter 1. angegebene periodische Längenänderung ausserordentlich vergrössert.

Die Kurve für die Längenänderung bei Gleichstromerregung (Fig. 16) zeigt keinen einfachen Verlauf. Das Eisen zieht sich beim Magnetisieren in schwachen Feldern zusammen, dehnt sich in mittleren Feldern aus, und endlich bei starker Magnetisierung zieht es sich zusammen, so dass es kürzer wird als im unmagnetischen Zustande. Einen Grund für diese letzte Verkürzung kann man in der Anziehung der beiden Polflächen gegeneinander suchen.

Die gesamte Eisenlänge des Magneten ist (Seite 17, Fig. 7) 25 cm. Für die Berechnung der durch die Anziehung der Pole verursachten Verkürzung benutzen wir die Formel für die Anziehungskraft:

$$P = \frac{B^2 q}{8 \pi} \text{ Dynen}$$

wo B die Kraftlinienzahl pro cm² und q der Eisenquerschnitt ist. Nimmt man an, dass die Sättigung B überall im Eisen konstant ist, und dass das Eisen einen Elastizitätskoeffizienten $E = 1800000$ kg/cm² hat, so

ergibt sich die von der gegenseitigen Anziehung der Pole herrührende Verkürzung in mm.

$$dl' = \frac{P}{E} \cdot \frac{\text{Eisenlänge}}{\text{Eisenquerschnitt}} = \frac{B^2\, q}{8\,\pi} \cdot \frac{1}{9{,}8 \,.\, 10^5} \cdot \frac{1}{1\,800\,000} \cdot \frac{250}{q}$$

$$= 5{,}65 \,.\, 10^{-12} \,.\, B^2 \text{ mm}.$$

Die durch die gegenseitige Anziehung der Pole hervorgebrachte Verkürzung dl' kann hieraus für alle Feldstärken bzw. Erregerströme berechnet werden. Wird dieser Betrag zu der Gesamtverlängerung addiert, so erhält man die beim Magnetisieren durch die Umlagerung der Moleküle hervorgebrachte Längenänderung dl_0. Eine solche Umrechnung ist in der folgenden Tabelle durchgeführt, indem die letzte Kolonne die gesuchte Längenänderung enthält. dl ist aus der Kurve (Fig. 16) entnommen.

Tabelle Nr. 26.

i	B	dl'	dl	dl_0
4	1900	20	— 80	— 60
8	3800	82	— 80	+ 2
12	5700	184	— 40	+ 144
16	7600	328	+ 30	+ 358
20	9300	491	+ 120	+ 611
24	11000	683	+ 200	+ 883
28	12600	893	+ 210	+ 1103
32	14000	1108	+ 70	+ 1178
36	15200	1310	— 250	+ 1060
40	15900	1430	— 550	+ 880
44	16600	1560	— 800	+ 760

Wie man sieht, kommt man bei grösseren Stromstärken nicht mehr auf eine durch die Umlagerung der Moleküle hervorgebrachte Verkürzung. Indessen nimmt die Verlängerung ab von 1178 $\mu\mu$ bei 32 Amp. auf 760 $\mu\mu$ bei 44 Amp. Erregung.

Es erscheint eigentümlich, dass die Werte für dl_0 die letzte Komplikation zeigen, und es wäre fraglich, ob man nicht durch eine andere Wahl des Elastizitätskoeffizienten E ein dl_0 bekommen würde, das bei grossen Stromstärken nicht mehr sinkt, sondern sich an einen konstanten Wert nähert. Eine kleine Ueberlegung zeigt indessen, dass ein bei grossen Stromstärken konstanter Wert für dl_0 nur erhalten wird, wenn man für den Elastizitätskoeffizienten einen Wert von etwa 940000 annimmt. Ein solcher Wert ist aber hier völlig ausgeschlossen. (E für weiches Schmiedeeisen = 1700000 bis 2000000 kg/cm².)

Das durch die Werte von dl_0 bezeichnete Verhalten kann man sich anschaulich machen durch Benutzung der Annahme, welche *Wiedemann*[1]) für den Aufbau eines Magneten aus Molekularmagneten gegeben hat. Ist die Feldstärke sehr gross, so muss die Eisenlänge kleiner sein,

[1]) Wied. Elektr. 3, 104.

als wenn bei einer etwas kleineren Feldstärke die Molekularmagnete nicht vollständig parallel gerichtet sind. In kleineren Feldern liegen diese durcheinander, d. h. sie müssen ihre grössere Ausdehnung in ihrer magnetischen Achse haben, damit die Gesamtlänge des Eisenkernes bei schwachen Feldern kleiner ist als bei starken Feldern.

Ueber die Ursachen des eigentümlichen Verlaufes der periodischen Längenänderung (Fig. 17) lässt sich etwa Folgendes sagen:

Für die Periodenzahl $n = 24$ erkennt man eine gewisse Uebereinstimmung mit der Gleichstromkurve (Fig. 16). Das ausgeprägte Minimum bei 28 Amp. Stromstärke (Fig. 17) entspricht vollkommen dem Maximum der Eisenlänge bei Gleichstromerregung. Für die Periodenzahl 24, wo die Aenderung in der Kraftlinienzahl infolge der geringen Wirbelstrombildung ziemlich gross ist, ist die Längenänderung bei Gleichstromerregung massgebend. Für höhere Periodenzahlen ($n = 53$) ist das eben erwähnte Minimum kaum mehr zu erkennen. Die Wirbelstrombildung nimmt in dem massiven Eisenstab mit der Periodenzahl sehr stark zu, so dass die Feldänderung bei 1 Amp. übergelagertem Wechselstrom mit höheren Periodenzahlen sehr schnell abnimmt, was auch aus den Tabellen Nr. 24 und 25 zu erkennen ist. Trotzdem sind die periodischen Ausdehnungen für mittlere und grosse Stromstärken für die Periodenzahlen 53, 235 und 400 von derselben Ordnung. Dieses Resultat deutet auf einen mit wachsender Periodenzahl schnell zunehmenden Faktor, der die periodischen Längenänderungen sehr vergrössert. Dieser ist bei schwachen Gleichstromfeldern ohne Bedeutung, nimmt aber in mittleren Feldern ausserordentlich zu, während er in starken Feldern je nach der Periodenzahl sehr verschieden ist.

Dieser Faktor kann nur von der gegenseitigen Lage der Moleküle abhängig sein. Die Ausdehnung des Eisens bei Gleichstromerregung ist für denselben ohne Bedeutung, ebenso die darin enthaltene Anziehung beider Polflächen gegeneinander.

Durch das Magnetisieren des Eisenkernes mit Gleichstrom und darübergelagertem Wechselstrom ändern die Molekularmagnete fortwährend die Richtung ihrer magnetischen Achsen. Durch diese Drehung werden in dem benachbarten Eisen elektromotorische Kräfte induziert, die wegen des vorhandenen kleinen elektrischen Widerstandes Wirbelströme erzeugen, welche einer Aenderung der Feldstärke entgegenwirken. In Fig. 19 ist dieses angedeutet. i_f sei ein entstehender Wirbelstrom. So lange das Gleichstromfeld schwach oder gleich Null ist, liegen die Molekularmagnete mit ihren Achsen nach allen

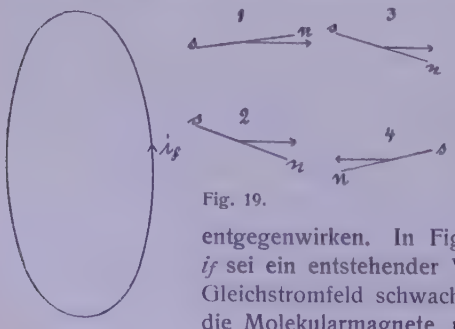


Fig. 19.

möglichen Richtungen, 3 und 4; die entstehende Wirbelstrombildung ist zwar gross; aber wie aus der Figur zu ersehen ist, muss in dem angedeuteten Fall vom Wirbelstrom *if* Magnet 4 angezogen und Magnet 3 abgestossen werden. Da die beiden Molekularmagnete sehr nahe an einander liegen, ist die Summe der Wirkungen des Wirbelstromes auf diese nahe gleich Null. Die Summe der Kraftwirkungen zwischen einer grösseren Anzahl Molekularmagnete und den im benachbarten Eisen vorhandenen Wirbelströmen muss somit wegen der verschiedenen Richtungen der Molekularmagnetachsen klein bleiben. Daher wird auch die periodische Längenänderung des Eisens klein sein, wenn das Gleichstromfeld schwach ist.

Anders liegt die Sache, wenn neben der wechselnden Erregung ein starkes Gleichstromfeld vorhanden ist. In diesem Falle liegen die meisten Molekularmagnete mit ihren Achsen nach einer und derselben Richtung, nach der Achse des Magneten (Fig. 19) 1 und 2. Durch die übergelagerte Wechselstromerregung drehen sich die Achsen der Molekularmagnete, während Wirbelströme erzeugt werden, die diese Bewegung hemmen. Aus der Figur sieht man, dass die Kraftwirkung eines Wirbelstromes *if* auf 1 und 2 in demselben Sinne erfolgt, und da die Molekularmagnete zum grössten Teil alle nach derselben Richtung liegen, wird die nach Grösse und Richtung immer wechselnde Anziehung der Molekularmagnete auf die Wirbelströme sich gegenseitig unterstützen; die Gesamtwirkung muss auf die periodischen Längenänderungen einen bedeutenden Einfluss ausüben.

Aus den Kurven Fig. 17 ist in Uebereinstimmung mit der vorgetragenen Anschauung zunächst das schnelle Anwachsen der Längenänderung zu ersehen, wenn ein Gleichstromfeld entsteht. Das Maximum wird bei kleinen Periodenzahlen erst erreicht, wenn das Gleichstromfeld sehr stark ist. Für die höheren Periodenzahlen verschiebt sich das Maximum nach links, d. h. nach kleinerer Sättigung, so dass bei $n = 400$ dieses schon bei etwa 21 Amp. Gleichstromerregung erreicht ist.

Lebenslauf.

Unterzeichneter, geboren zu Bjugn in Norwegen, Kreis Trondjem, am 12. 9. 1877, Sohn des Pastors Adolf Riddervold und seiner Ehefrau Laura, geborene Storm, ist norwegischer Staatsangehöriger und evangelisch-lutherischer Konfession. Er hat durch private Erziehung von 1883 bis 1886 die Vorschulbildung erhalten, und vom Herbst 1886 bis Herbst 1895 das Gymnasium (kommunale höiere almenskole) zu Fredriksstad besucht. Nach bestandener Reifeprüfung liess er sich an der kgl. Universität Christiania vom Herbst 1895 bis Juli 1896 immatrikulieren und legte am Schluss dieser Zeit das examen philosophicum ab. Vom Juli 1896 bis September 1897 besuchte er die kgl. Kriegsschule zu Christiania, die er nach Erwerbung des Reserveoffizierspatentes verliess. Darauf bezog er im September 1897 wieder die kgl. Universität Christiania, die er nach Ablegung des Staatsexamens der mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung am 1. Juni 1902 verliess, um sich an der Expedition zur Erforschung des Erdmagnetismus und Nordlichtes des Herrn Professors Kr. Birkeland als Leiter der Teilexpedition nach Nowaja Semlja von Juli 1902 bis August 1903 zu beteiligen.

Nach seiner Rückkehr war er an der Christies Schule in Christiania von Oktober 1903 bis Juni 1904 als Lehrer für Physik und Mathematik angestellt. Darauf ergänzte er seine wissenschaftliche Bildung durch den Besuch der Kgl. Technischen Hochschule in Hannover vom Oktober 1904 bis Juli 1905, und trat ebendort am 1. September 1905 als Assistent am Elektrotechnischen Institut ein, welche Stellung er zur Zeit noch innehat. In dieser Zeit hat er im Physikalischen Institut der selben Hochschule auf Anregung des Herrn Professors Precht die beiliegende wissenschaftliche Abhandlung vollendet.

Hans Riddervold.